

**Desenvolvimento e construção dum sistema interferométrico
shear baseado da *shearography speckle* para medição de
deformações no plano**



Simão Manuel Morais Geraldes

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em:

Engenharia Industrial

Ramo Engenharia Mecânica

Novembro 2008

Aos meus filhos Samuel e Inês e à minha esposa Fátima

Agradecimentos

Muitas pessoas contribuíram para esta tese e este é o momento de lhes agradecer. Em primeiro lugar agradeço ao orientador Professor Doutor João Ribeiro que sempre me incentivou e motivou para o desenvolvimento do sistema *Shear*, ao Professor Doutor Hernâni Lopes pelo seu apoio essencial para a conclusão desta tese.

Ao Professor Mário Vaz por me ter facultado o acesso ao Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental (LOME) e disponibilizado todo o equipamento nele existente para a realização deste trabalho. Ao engenheiro Nuno Ramos funcionário do LOME pelo seu apoio e disponibilidade nas diferentes ajudas que me prestou.

Aos meus amigos e colegas Tiago Pinto, Luísa Barreira e Maria José pelo incentivo e constante encorajamento durante este ano de tantas mudanças na minha vida profissional. Ao professor Doutor Paulo Piloto pelo seu apoio e sua disponibilidade para o aconselhamento em diversas questões.

Aos sócios gerentes da empresa Megajoule II, por sempre se terem mostrado disponíveis em me facilitarem as minhas diversas idas à FEUP.

Por último, quero reconhecer o apoio de toda a minha família, em especial o da minha mulher e meus filhos, que sempre me ajudaram a ultrapassar as mais diversas dificuldades e a eles peço as minhas desculpas pelo tempo que lhes roubei.

Lista de símbolos

Símbolo	Significado
A	Área
b	Largura da secção transversal da viga
B	Campo magnético, brilho
c	Velocidade de propagação da onda electromagnética, coeficiente de correlação
C	Contraste
d	Tamanho do <i>speckle</i> , distância
D	Diâmetro
E	Campo eléctrico, energia, módulo de elasticidade
f	Frequência da perturbação, distância focal
h	Constante de Planck, função hermito-gaussiana, espessura
i	Coordenada do píxel na direcção horizontal da imagem
I	Intensidade
J	Função de Bessel, função de auto-correlação
k	Vector de onda, número de onda, vector sensibilidade
K	Constante de Boltzmann
L	Comprimento da cavidade ressonante
l_c	Comprimento de coerência
M	Função modulação
n	Número de fótons, índice de refração
N	Número de átomos, de modos guiados, de imagens, ...
NA	Abertura numérica
p	Passo da portadora
P	Polarização, tamanho do pixel, pressão, função pupila do sistema óptico
q	Parâmetro complexo
r	Vector posição

R	Função de auto-correlação
t	Tempo
T	Temperatura
U	Frente de onda
V	Frequência normalizada
x	Posição axial
y	Posição axial
z	Distância, deslocamento
Z	Amplitude de vibração
α	Incremento de fase
β	Constante de propagação numa fibra óptica, rotação do espelho
γ	Rotação da superfície, ângulo entre iluminações
Δ	Variação
Δt	Intervalo de tempo
Δx	<i>Shear</i> entre imagens, Translação da frente de onda na direcção horizontal
Δy	Translação da frente de onda na direcção vertical
$\Delta\Phi(x,y)$	Mapa de fase
$\Delta\tilde{\Phi}(\mathbf{u},\mathbf{v})$	Representação do mapa de fase no domínio do número de onda
$\Delta\tilde{\Phi}'(\mathbf{x},\mathbf{y})$	Representação do mapa de fase filtrado no domínio do número de onda
ε	Translação do espelho
ε_0	Permitividade eléctrica do vazio
ν	Frequência da perturbação, coeficiente de Poisson
λ	Comprimento de onda
θ	Ângulo
ω	Colo do feixe laser, frequência angular
χ	Susceptibilidade eléctrica
Φ	Fase
μ_0	Permeabilidade magnética do vazio
φ	Fase
ρ	Massa específica

σ	Desvio Padrão
σ^2	Variância da intensidade
$\langle \rangle$	Valor médio
$\psi(x,y)$	Mapa de fase da interferência de duas frentes de onda
∇^2	Operador Laplaciano

Lista de abreviaturas

A/D	Analógico/Digital
CAD/CAM	Computed Assisted Design / Computed Assisted Manufacturing
CCD	Charged Coupled Device
C-MOS	Condensador Metal Oxido Silício
CNC	Computer Numerical Control
ESPI	Electronic Speckle Pattern Interferometry
FFT	Fast Fourier Transform
FFT ⁻¹	Inverse Fast Fourier Transform
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LFAC	Laboratório de Fabricação Assistida por Computador
LOME	Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental
MEF	Método dos Elementos Finitos
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
PZT	Piezo-electric transducer
SST	Sistema de Sincronização Temporal

Lista de figuras

Figura 1.1 - Medição do campo de deslocamentos <i>no-plano</i> e <i>fora-do-plano</i> na vizinhança de uma fenda de penetração parcial numa placa submetida a tracção no plano segundo a direcção normal ao plano da fenda [2].....	31
Figura 1.2 - Helicóptero NH-90 e ensaios em estaleiro realizados no IABG na Alemanha sobre a cauda em material compósito utilizando o sistema de <i>Shearography</i> desenvolvido no LOME [2]	32
Figura 1.3 - Mapa de fase e mapa de fase codificado em falsa cor obtidos para uma área onde existe um conjunto de defeitos provocados por múltiplos impactos num componente em material compósito [2].....	32
Figura 2.1 - Superfície rugosa de um objecto iluminada por luz coerente, ampliação mostrando a estrutura do <i>speckle</i> [3].....	36
Figura 2.2- Formação de <i>speckle</i> subjectivo através de um sistema óptico formador de imagem [3].....	37
Figura 2.3 - Imagem de um objecto iluminado com um <i>laser</i> através de um sistema óptico de abertura f/8 e f/16 [3].....	38
Figura 2.4 - Configuração de um interferómetro de <i>speckle</i> para medição de deslocamentos fora do plano [3]..	44
Figura 2.5 - Configuração de um interferómetro de <i>speckle</i> para medição de deslocamentos no plano	45
Figura 2.6 – Diagrama esquemático de um sistema de ESPI convencional [5].....	47
Figura 2.7 – Configuração de um interferómetro de <i>speckle</i> sensível ao gradiente de deslocamento fora do plano [3].....	48
Figura 2.8 – Configuração de um sistema de medição interferométrico.....	49
Figura 2.9 – Interferómetro de Michelson para medições de gradientes de deslocamento fora do plano [3].....	50
Figura 2.10 – Interferência de duas ondas planas [5].....	51
Figura 2.11 – Representação esquemática duma montagem de Shearografia [15].	51
Figura 2.12 – Representação de Shearografia; M-espelho, BE- feixe expandido, PZM espelho piezoeléctrico [10].....	52
Figura 2.13 – a) Interferograma de shearografia b) Interferometria <i>speckle</i> fora do plano, c) Gradiente de vibração d)Amplitude de vibração imprimida [9].....	53

Figura 2.14 – Representação completa da técnica de shearografia [7].....	53
Figura 2.15 – Sistema ESPI [7].....	54
Figura 2.16 – Sistema SHEAR	55
Figura 2.17 – Sistema ESPI.....	55
Figura 2.18 – Montagem óptica para shearography e comparação entre os padrões obtidos com esta técnica e os obtidos com uma montagem convencional de ESPI [8].....	55
Figura 2.19 – Obtenção de um mapa de fase a partir de 4 padrões de <i>speckle</i> secundários [3].....	58
Figura 2.20 - Componentes do sistema de aquisição e de processamento digital das imagens interferométricas [21].....	59
Figura 2.21 – Tecnologia CCD de registo de imagem [19].....	61
Figura 2.22 – Os três tipos básicos de transferência de carga num CCD [4].....	61
Figura 3.1 - Representação do sistema shear com a câmara.....	68
Figura 3.2 – Representação esquemática do Interferómetro de Michelson	69
Figura 3.3 - Representação do bloco central (peça 7).....	70
Figura 3.4 - Representação esquemática da peça 1 com o divisor de feixe.....	71
Figura 3.5 – Representação da peça 1 devidamente encaixada no corpo central.....	72
Figura 3.6 – Representação da peça 5 de encaixe da íris e da lente. (A) com o encaixe para a lente, (B) a vista em corte da peça 5 com os dois sistemas nela posicionados.....	73
Figura 3.7 – Representação esquemática do casquilho com o sistema íris-lente montado no corpo central.....	73
Figura 3.8 – <i>Phase stepping</i> com um elemento piezoelétrico [2].....	74
Figura. 3.9 - Peça de suporte do piezoelétrico.....	74
Figura 3.10 – Peça 8 com o piezoelétrico e o espelho.....	74
Figura 3.11 – Sistema completo do apoio do piezoelétrico.....	75
Figura 3.12 – Espelho montado no suporte (peça 2).....	75
Figura 3.13 – Sistema para criar o <i>Shear</i> no espelho.....	76
Figura 3.14 – Peça a ser executadas na CNC do LFAC.....	77

Figura 3.15 – Maquinagem das peças nas máquinas ferramentas convencionais.....	78
Figura 3.16 – As peças do sistema <i>shear</i>	78
Figura 3.17 – Simulação de maquinagem.....	79
Figura 3.18 – O sistema <i>shear</i> representado em perspectiva explodida.....	80
Figura 3.19 – Alguns dos elementos maquinados e a fase de montagem.....	81
Figura 3.20.a) O modelo tridimensional de conjunto do sistema <i>Shear</i> ; 3.20.b) O sistema <i>Shear</i> depois de montado.....	82
Figura 3.21 – Padrão da calibração óptica[3].....	83
Figura 3.22 – Procedimento de calibração[3].....	83
Figura 3.23 – Procedimento de correcção das distorções ópticas[3].....	84
Figura 3.24 – Processo de ajuste da translação da imagem.....	85
Figura 3.25 – Processo de ajuste da translação da imagem (translação horizontal de 15mm).....	85
Figura 3.26 – Franjas de interferência da medição[3].....	84
Figura 3.27 - Sistema <i>Shear</i>	86
 Figura 4.1 - Representação esquemática da montagem experimental usada para a medição dos campos de rotações e deformações no plano para as vigas em consola.....	 89
Figura 4.2 - Montagem experimental da viga encastrada-livre.....	89
Figura 4.3 - Iluminação da viga com os dois feixes.....	90
Figura 4.4 - Aplicação de deslocamento na extremidade livre viga.....	91
Figura 4.5 - Diagrama para a determinação do mapa de fase a partir de 8 registos da intensidade holográfica, concretizada pela técnica de salto de fase de 4 imagens (técnica de modelação temporal de fase).....	92
Figura 4.6 - Representação do mapa de fase (lado esquerdo) e do respectivo campo de medida.....	93
Figura 4.7 - Representação da viga encastrada-livre.....	94
Figura 4.8 - Definição do vector sensibilidade para dupla iluminação.....	94
Figura 4.9- Mapas de fase do campo de rotação e deformação para a viga de Alumínio.....	95

Figura 4.10 - Campos de rotação e deformação da viga de Alumínio na condição encastrada-livre e solicitada na extremidade livre.....	96
Figura 4.11 - Mapas de fase do campo de rotação e deformação para a viga de madeira.....	97
Figura 4.12 - Campos de rotação e deformação da viga de pinho bravo na condição encastrada-livre e solicitada na extremidade livre.....	98
Figura 4.13 - Representação das condições fronteira aplicadas.....	99
Figura 4.14 - Caminho escolhido para análise da evolução das deformações no plano, na direcção x.....	99
Figura 4.15 - Representação do campo de deformações determinado numericamente.....	100
Figura 4.16 - Evolução da deformação em x mediatriz da face superior da viga.....	100
Figura 4.17 - Representação das condições de fronteira e a deformação na viga.....	101
Figura 4.18 - Evolução da deformação em x ao longo da mediatriz da viga.....	102
Figura 4.19 - Comparação entre os valores da rotação no plano, obtidos numericamente e medidos experimentalmente com sistema <i>Shear</i> para a viga em alumínio.....	103
Figura 4.20 - Comparação entre os valores da deformação obtidos numericamente e medidos experimentalmente com sistema <i>Shear</i> para a viga em alumínio.....	103
Figura 4.21 - Comparação entre os valores da rotação no plano, obtidos numericamente e medidos experimentalmente com sistema <i>Shear</i> para a viga em madeira.....	104
Figura 4.22 - Comparação entre os valores da deformação obtidos numericamente e medidos experimentalmente com sistema <i>Shear</i> para a viga em madeira.....	105

“Desenvolvimento e construção dum sistema interferométrico *Shear* baseado da *shearography speckle* para medição de deformações no plano”

por

Simão Manuel Morais Geraldes

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em:
Engenharia Industrial ramo [Engenharia Mecânica] pela Escola Superior de Tecnologia e Gestão do
Instituto Politécnico de Bragança

Realizada sob a supervisão de:

Prof. Doutor João Eduardo Pinto Castro Ribeiro

Resumo

O trabalho aqui apresentado consistiu no desenvolvimento, fabrico e montagem de um sistema de sherografia *speckle*.

Com base na configuração do interferómetro de Michelson desenvolveu-se um sistema de sherografia portátil, compacto e menos sensível a interferências externas. Para isso, foi necessário dimensionar o tamanho do sistema e os componentes ópticos adequados. Após isto, desenvolveram-se elementos de suporte para fixar os componentes ópticos utilizados.

Após a fase do desenvolvimento do sistema fez-se o fabrico dos elementos projectados para a montagem do sistema *Shear*. Para isso, fez-se a modelação tridimensional, a simulação da maquinaria e geração do código CNC num sistema de CAM e a maquinaria numa fresadora de comando numérico.

Fixaram-se os componentes ópticos nos elementos de suporte fabricados e fez-se a montagem do sistema. Posteriormente executou-se a sua calibração.

Foi implementado o ensaio experimental de uma viga em consola, utilizando dois materiais com características mecânicas diferentes, alumínio e madeira. Foi aplicado um deslocamento na extremidade livre da viga, sendo esta duplamente iluminada com feixes laser. Para cada feixe em separado, foram captadas quatro imagens de referência (antes da aplicação do deslocamento) e quatro após a deformação. Cada grupo de quatro imagens tem um salto de fase $\pi/2$.

Para avaliar os resultados obtidos experimentalmente implementaram-se um conjunto de simulações numéricas recorrendo a um programa de elementos finitos.

Comparando os resultados verificou-se que há uma boa concordância entre os resultados obtidos com a medição experimental utilizando o sistema *Shear* e os determinados numericamente.

No final deste trabalho foram propostas algumas sugestões para a melhoria deste sistema.

Palavras-chave: *Shear*, *Shearografia speckle*, interferometria, mecânica experimental

“Development and construction of a Shear interferometric system based on speckle shearography for measurement in-plane strains”

by

Simão Manuel Morais Geraldês

Thesis submitted for the fulfilment of Ms.C degree in:

Industrial Engineering branch [**Mechanical Engineering**] of the
School of Technology and Management, Polytechnic Institute of Bragança

Supervised by

Prof. Doutor João Eduardo Pinto Castro Ribeiro

Abstract

The present work shows the development, manufacturing and assembly of a speckle shearography system.

The shearography system was developed based on Michelson interferometer configuration. This system has some important advantages: it is portable, compact and less sensitive to external interferences. It was needed dimensioning the system size and the optical components. After this, were developed support elements to settle the used optical components.

After the development stage, the design elements were manufactured and, later, the Shear system was assembled. It was made the three-dimensional modulation, the machining simulation and the CNC code generation were obtained in CAM software. The machining of elements was made in a numerical control milling machine.

The optical components were fixed on the manufactured support elements and it was executed the assembly of shearography system. Later, this system was calibrated.

An experimental test was implemented, choosing a free-restrain beam test and using two materials with different mechanical characteristics, aluminum and wood. It was applied a displacement value on the free edge of beam, which was doubly illuminated by lasers beams. Four reference images were recorded (before the application of the displacement) and four after the deformation, for each laser beam. Each group of four images has a phase shifting of $\pi/2$.

For evaluate the obtained experimental results, were implemented numerical simulations using a finite elements software.

In the results comparison was verified that there is a good agreement among the results obtained with the experimental measurement using the Shear system and the numerically computed.

In the end of this work, were proposed some suggestions for the improvement of this system.

Keywords: Shear, speckle shearography, interferometry, experimental mechanics.

Índice

Capítulo 1 - Óptica e mecânica experimental	25
1.1 - Introdução	25
1.2 - Objectivos do trabalho	26
1.3 - Da Interferência à Interferometria de <i>speckle</i>	26
1.4 - Aplicações da Interferometria de <i>Speckle</i>	30
1.5 - Referências.....	33
Capitulo 2 - Técnicas de Interferometria e Processamento de Imagem	34
2.1- Interferometria	34
2.1.1 - O <i>Speckle</i>	35
2.1.1.1- O brilho do speckle	36
2.1.1.2 - O Tamanho de speckle	38
2.1.2- Correlação	40
2.1.2.1 - Correlação de padrões de speckle por subtracção	41
2.1.2.2 - Formação de franjas por correlação de speckle	41
2.1.2.2.1 - Interferómetro sensível a deslocamentos fora do plano	44
2.2.2.2 - Interferómetro sensível aos deslocamentos no plano	45
2.2.2.2.1 - <i>Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI)</i>	46
2.1.2.2.3 - Interferómetro sensível a gradientes de deslocamento fora do plano (<i>Shear</i>)	47
2.1.2.2.3.1 - O Interferómetro de Michelson	49
2.1.2.2.4 - Shearografia	51
2.1.2.2.5 - Comparação Shearography Versus ESPI	54
2.1.3- Descorrelação	55
2.2- Cálculo de Fase	56
2.2.1 - Técnicas de modulação temporal	57
2.3 – Técnicas de processamento de imagem	59
2.3.1 - A tecnologia de aquisição de imagem	60
2.3.1.1 - Opções de transferência de cargas	61
2.3.1.2 - Técnicas de filtragem dos mapas de fase	62
2.3.1.3 - Método de unwrapping da fase	64
2.3.1.4 - Técnicas de filtragem do campo de medida	65
2.4- Referências	66
Capítulo 3- Desenvolvimento e fabrico do sistema <i>shear</i>	68
3.1- Representação do sistema	68

3.2 - Componentes para o sistema <i>Shear</i>	69
3.2.1 - Corpo central	70
3.2.2 - Divisor de feixe	71
3.2.3 - Lente e Iris	72
3.2.4 - Espelho com Piezoeletrico	73
3.2.5 - Espelho para o <i>Shear</i>	75
3.2.6 - Câmara CCD	76
3.3 - Fabrico e montagem do sistema <i>Shear</i>	77
3.3.1 - Procedimentos de maquinagem	78
3.3.2 - Montagem do sistema óptico	80
3.4 - Calibração do sistema óptico	82
3.5 - Calibração da fase	84
3.6 - Sistema <i>Shear</i>	86
3.7 - Referência	87
 Capítulo 4 - Estudo experimental e numérico do campo de rotações e deformações	88
4.1 - Introdução.....	88
4.2 - Montagem experimental.....	89
4.2.1 - Viga em alumínio	94
4.2.2 - Viga em madeira.....	96
4.3 - Simulação numérica	98
4.3.2 - Viga em alumínio	99
4.3.2 - Viga em madeira.....	101
4.4 - Comparação de resultados.....	102
4.5 - Referências	106
 Capitulo 5 – Conclusões e sugestões para futuro desenvolvimento	107
5.1- Nota final	107
5.2 – Proposta de trabalhos futuros	108
 Anexo A - Desenhos de definição do sistema <i>shear</i>	109
Anexo B - Folha de Inspeção	123
Anexo C - Procedimentos de Maquinagem	125
Anexo D - Ensaio de tracção da madeira.....	129
Anexo E – Diferentes sistemas que foram testados e não foram englobados na solução final	132

Capítulo 1 - Óptica e Mecânica Experimental

1.1 - Introdução

A ciência dos materiais tem sofrido uma enorme evolução nas últimas décadas. Para isso, muito têm contribuído os investigadores que desenvolvem novos materiais e novas aplicações. A produção de novos materiais está cada vez mais direccionada para aplicações específicas utilizando novos conceitos de optimização, permitindo uma poupança de material e melhorando as propriedades necessárias para aplicação a que se destina.

Com o surgimento destes novos materiais torna-se necessário o desenvolvimento de novas técnicas experimentais e numéricas que permitam estudar, com rigor, as suas propriedades. Os métodos experimentais assumem um papel muito importante para a execução de medições directamente nos protótipos. Assim, assumem um especial interesse as técnicas experimentais que permitam uma medição de campo, não destrutivas e sem contacto. As técnicas experimentais mais divulgadas que têm as características referidas são as técnicas de Interferometria Holográfica. Estas técnicas utilizam o comprimento de onda como unidade de medida, têm uma elevada resolução, na ordem dos nanómetros. A possibilidade de utilização de sistemas automáticos de análise de resultados, baseados em sistemas de processamento de imagem e técnicas de modulação de fase, permitem analisar de uma forma rápida a enorme quantidade de informação que os interferogramas disponibilizam.

Pelas razões apontadas, existe um grande interesse por estas técnicas na aplicação em problemas de Engenharia, nomeadamente no estudo de casos em que ainda não existam soluções numéricas fiáveis.

Pode-se, também, referir-se a possibilidade de, após reduzir significativamente a sensibilidade a perturbações, construir de sistemas compactos e portáteis.

O sistema, desenvolvido no âmbito deste trabalho, foi testado com o intuito de verificar a sua fiabilidade e eficiência.

1.2 - Objectivos do trabalho

Neste trabalho pretende-se desenvolver um sistema interferométrico baseado na técnica de *Shearography Speckle* para a medição do campo de deformações no plano. Ele encontra-se organizado da seguinte forma:

No capítulo 1 é feita uma breve introdução à óptica e mecânica experimental, a evolução da interferência à interferometria de *speckle*. São também abordadas algumas aplicações das técnicas de interferometria *speckle*.

No capítulo 2 é feita uma análise das diferentes técnicas ópticas de medição experimental baseadas na interferometria *speckle*. Abordam-se os diferentes tipos de interferómetro: sensíveis a deslocamentos no plano, fora do plano e sensíveis a gradientes de deslocamento fora do plano (*Shear*). Será dado um especial ênfase ao sistema interferométrico do tipo Michelson. É feita uma comparação entre as técnicas de ESPI e *Shearography*, destacando-se, nesta dissertação, a técnica de *Shearography*. São também descritas algumas técnicas de processamento de imagem.

No capítulo 3 será feito o desenvolvimento dum sistema *Shear* portátil. Inicia-se, com a concepção do sistema, passando para o processo de fabrico, onde são indicados os procedimentos de maquinagem e todos os cuidados a ter para a obtenção de um produto de qualidade. Após a maquinagem dos diferentes componentes mecânicos de suporte dos elementos ópticos, procedeu-se à montagem do sistema *Shear*. Neste capítulo desenvolveram-se, também, procedimentos de calibração para o sistema óptico e para o cálculo de fase.

No capítulo 4, testou-se o sistema desenvolvido e construído ao longo deste trabalho. Para isso, executaram-se algumas medições de deformações no plano e rotações que ocorrem em vigas em consola e onde se aplicou um determinado deslocamento na sua extremidade livre. Os resultados obtidos foram processados recorrendo a algoritmos de processamento de imagem desenvolvidos para este tipo de aplicações. Para verificar os resultados obtidos experimentalmente com o sistema *Shear* realizam-se simulações numéricas dos ensaios, recorrendo a um programa de elementos finitos. Posteriormente fez-se a comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e determinados numericamente.

As conclusões do trabalho elaborado nesta dissertação são apresentadas no capítulo 5. São também sugeridas algumas propostas para trabalhos futuros com o objectivo de melhoria do sistema *Shear* desenvolvido.

1.3 - Da Interferência à Interferometria de *speckle*

A natureza electromagnética da luz é conhecida desde o final do século XIX, devido ao trabalho de James Clerk Maxwell que conciliando todos os conhecimentos experimentais acumulados sobre os fenómenos eléctricos e magnéticos num conjunto único de equações matemáticas. Com base nesta síntese, sucinta e simétrica, Maxwell foi capaz de mostrar teoricamente que o campo electromagnético se podia propagar como uma onda transversa no éter. A luz é “uma perturbação electromagnética que, sob a forma de ondas, se propaga

através do éter” [1]. Maxwell expressou a velocidade de propagação da onda em função das características eléctricas e magnéticas do meio, no vazio tem um valor de 299274 [Km/s]. Uma onda electromagnética corresponde à propagação simultânea de um campo eléctrico e um campo magnético perpendiculares que variam sinusoidalmente em fase [2]. Maxwell para descrever a propagação de uma onda electromagnética propôs as seguintes equações:

$$\nabla^2 E = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \qquad \nabla^2 B = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \qquad \text{Equação 1.1}$$

onde **E** e **B** representam, respectivamente, os campos eléctrico e magnético, ϵ_0 é a permissividade eléctrica do vácuo, igual a $8.8542 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$, μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo igual a $4\pi * 10^{-7} \text{ N s}^2 \text{ C}^{-2}$, **t** é o tempo e o Laplaciano ∇^2 , que opera sobre cada uma das componentes E e B, corresponde a:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \qquad \text{Equação 2.2}$$

As leis da Electrodinâmica clássica permitem prever que a energia se propaga continuamente através de ondas electromagnéticas. Contudo, as interacções electromagnéticas e os fluxos de energia podem também ser descritos como conjuntos de partículas elementares destituídas de massa, fotões, que Max Karl Ernst Ludwig Planck designou por quanta de energia [2].

Os princípios fundamentais da interferência da luz como resultado da soma das oscilações luminosas foram formulados por Thomas Young [3], em que defendeu a teoria ondulatória e incorporando-lhe um novo conceito fundamental, o chamado princípio de interferência: “Quando duas ondulações, com origens diferentes, se propagam exacta ou aproximadamente ao longo da mesma direcção, o seu efeito conjunto é uma combinação dos movimentos de cada uma” [1]. Mais tarde Augustin Jean Fresnel unificou os conceitos inerentes à descrição ondulatória de Huygens e ao princípio de interferências. Fresnel conseguiu calcular os padrões de difracção e chegar a uma explicação satisfatória da propagação rectilínea da luz em meios homogéneos e isotrópicos. De acordo com Young e Fresnel as franjas são devidas à soma das frentes de onda provenientes da mesma fonte de luz tendo em atenção as respectivas fases [2].

As experiências que usou Fresnel como argumento forte a favor da teoria ondulatória (fim do século XVIII e início do século XIX) foram, a interferência entre dois raios de luz, quando a luz passa por dois orifícios, ocorre difracção. Quando duas ondas emitidas em dois pontos são sobrepostas, obtêm-se um padrão de interferência: zonas fixas onde a onda resultante tem sempre um valor máximo ou mínimo. No caso da luz, esses padrões de interferência são observados como riscas claras e escuras. A difracção é a tendência que as ondas têm para se “dobram” contornando obstáculos. Nas áreas de contraste entre luz e sombra, numa imagem, aparecem padrões de interferência que são um sinal claro da difracção da luz. Esses dois fenómenos, interferência e difracção, são próprios do movimento ondulatório e não acontecem no caso de feixes de partículas. Assim, a interferência e a difracção da luz corroboram o seu carácter ondulatório [4].

Nos finais dos anos vinte, baseando-se na teoria onda/partícula para descrever a luz e na teoria estatística de Bose, Einstein deduziu as equações que descrevem a emissão estimulada de radiação [5].

Em 1960 Mainman descobriu que excitando com um feixe de luz branca muito intensa um cristal de rubi este emitia uma radiação monocromática com um comprimento de onda de 6943 Å [6]. Esta radiação luminosa, obtida por emissão estimulada, apresenta características de coerência que a distinguem da luz ordinária e foi designada por radiação L.A.S.E.R (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* - vulgarmente designada por *laser*). Com a descoberta do *laser* aumentou o interesse pelas técnicas de metrologia óptica e desenvolveram-se novos métodos e técnicas, que exploram as características geométricas e ondulatórias desta radiação [2].

Mas, paralelamente aos desenvolvimentos tecnológicos das fontes de luz, desenvolveram-se outras técnicas de reconstrução de frentes de onda, conhecida como holografia, que produz imagens tridimensionais tendo sido descobertas novas aplicações. Nesta técnica, que Dennis Gabor designou por Holografia (do grego *Holos* – o todo e *GRAPHOS*: sinal, escrita, pois é um método de registo "integral" com profundidade), a fase da frente de onda é gravada em modulações de amplitude resultantes da interferência com uma frente de onda de referência. Do registo obtido, o holograma, é possível recuperar a frente de onda inicial, utilizando apenas o feixe de referência utilizado na gravação. A necessidade de utilizar uma fonte de radiação coerente fez com que esta técnica não tivesse tido, nessa altura, uma grande divulgação [7]. De referir que a fonte de luz coerente mais utilizada era a lâmpada de vapor de mercúrio que, com o auxílio de filtros, permitia um comprimento de coerência de 0.03 a 0.2 [mm]. O reduzido comprimento de coerência da fonte de luz e a baixa resolução dos meios de registo de então apenas permitiam a gravação de hologramas em linha de objectos transparentes.

Embora a Holografia deva, em parte, a sua grande divulgação ao facto de ter sido encarada como curiosidade científica, devido à espectacularidade das imagens obtidas, alguns investigadores cedo se aperceberam das potencialidades desta técnica, nomeadamente em aplicações de metrologia óptica. As técnicas de Interferometria foram aplicadas com êxito a uma grande variedade de problemas metrológicos [8]. Contudo, a sua divulgação ficou muito aquém das expectativas geradas pelas potencialidades que esta técnica cedo revelou. Muita da relutância à sua utilização deveu-se ao meio utilizada no registo dos padrões de interferência. A emulsão fotográfica torna o processo de gravação moroso e a necessidade do processamento químico na revelação praticamente restringe a sua utilização em laboratório [2]. A substituição da emulsão fotográfica pela câmara de vídeo no registo dos padrões de interferência foi então proposto por Butters e Leendertz que considerou-a como uma extensão das técnicas de *speckle* (granitado *laser*) designando-a por *Electronic Speckle Pattern Interferometry* (ESPI). Esta técnica é também conhecida por outras designações como: Holografia-TV, Holografia Electro-Óptica, *Digital Speckle Pattern Interferometry* (DSPI) ou Holografia Imagem Electrónica. Uma variação destas técnicas é a Interferometria Diferencial, ou *Shearography*. Todas estas designações derivam da configuração da Interferometria Holográfica quando se utiliza um registo electrónico dos padrões de interferência, serão a partir de agora generalizadas como de Interferometria de *Speckle*.

Ao substituir a emulsão fotográfica, com uma resolução que pode ir até às 3000 linhas por mm, pelo alvo de uma câmara de vídeo cuja resolução é duas ordens de grandeza inferior, são impostas algumas limitações. A necessidade de aumentar o tamanho do *speckle* para o tornar compatível com a resolução do detector vídeo implica que o contraste das imagens resultantes seja muito inferior ao obtido com a Interferometria Holográfica. A informação registada é, no entanto, mais que suficiente para a maioria das aplicações onde aquela é normalmente utilizada. Mantendo a maioria das características da Interferometria

Holográfica, a Interferometria de *Speckle* com registo em vídeo, tem como principal vantagem a possibilidade de gravar hologramas à frequência do vídeo (25 imagens/segundo no sistema vídeo europeu ou 30 imagens/segundo no sistema americano) sem necessidade de reposicionamento ou processamento químico. Uma vantagem adicional, e não menos importante, é relativa aos procedimentos de segurança uma vez que o operador observa os resultados num monitor e não através de um feixe laser [2].

Com a evolução tecnológica foram desenvolvidos e aperfeiçoados novos equipamentos que tornam as técnicas de interferometria de *speckle* com registo em vídeo acessíveis à maioria dos grupos de investigação e permite que a evolução dos padrões de franja pode ser observada praticamente em tempo real, evitando assim possíveis erros de reposicionamento [9]. Os primeiros registos electrónicos dos padrões de interferência foram realizados em sistemas vidicom, passando depois a partir dos anos 70 a serem realizados pelas câmaras de CCD (Charge Coupled Devices) [10]. Estas formas de registo alteraram completamente a forma de gravação das imagens. Várias são as vantagens da utilização dos sistemas de CCD em relação às emulsões fotográficas, uma maior sensibilidade à luz, podem utilizar-se numa gama do espectro electromagnético que vai dos raios-X aos infravermelhos e têm uma versatilidade de construção que permite adaptá-los às mais variadas situações. Acresce ainda o facto de os circuitos necessários serem fabricados através das técnicas básicas de produção de semicondutores o que os torna relativamente baratos, simples e robustos.

As últimas evolução destes sistemas de registo de imagem tem-se verificado em direcções distintas. O aumento da resolução dos detectores (por aumento da quantidade de *pixels* na mesma área de leitura) e maior versatilidade na forma de leitura dos registos (utilização de leitura *frame-transfer*, *interline*, etc.). Assim, se os primeiros CCD's utilizavam matrizes de poucas centenas de *pixels*, quer por linha, quer por coluna, os existentes actualmente atingem os milhares de *pixels*. Para além disso, a forma de leitura dos registos electrónicos também evoluiu e actualmente diferentes formas são propostas *interline* ou *frame-transfer*.

Nas últimas décadas o desempenho dos lasers não pára de melhorar e de uma forma exponencial. Uma das tecnologias laser que continua com acentuado progresso é a dos semicondutores. Têm surgido novas estruturas que permitem potências mais elevadas e modulações mais rápidas, ao mesmo tempo que se atingem novos comprimentos de onda. A realização de díodos laser com comprimentos de onda visível continua, porém, aquém do esperado no que se refere a aplicações de Interferometria de *Speckle*. No entanto, nos últimos tempos, diferentes fabricantes lançaram produtos capazes de criar radiação coerente visível através de díodos. Estes, apesar de uma menor estabilidade espectral, podem contudo ser utilizados em montagens onde os comprimentos de coerência das fontes luminosas não necessitem de ser elevados, como é o caso da *Shearography* [12]. O aparecimento e comercialização de sistemas portáteis com análise automática dos resultados permitiram que esta técnica fique ao alcance de operadores com pouca preparação em óptica. Actualmente é grande a competição entre sistemas comerciais de Interferometria de *Speckle*, sobretudo no que diz respeito ao caso particular da técnica de *Shearography*. Esta técnica tem encontrado uma importante aplicação no Controlo Não Destrutivo (CND). O primeiro sistema comercial de *Shearography* apareceu nos Estados Unidos em 1980 [12], através da companhia LTI (Laser Technology, Inc.) que adquiriu a patente do sistema de *shearography* que Hung tinha inventado. Esta técnica foi rapidamente alvo de atenção por parte da indústria, sendo que a indústria aeronáutica a que mais atenção dedicou devido às possibilidades de controlo e inspecção não destrutiva dos equipamentos. Os novos caminhos a percorrer para as técnicas de Interferometria de *Speckle* têm como base os

desenvolvimentos na área da electrónica de processamento de imagem e a sua posterior integração em sistemas de Holografia-TV ou *Shearography*. Na verdade, mesmo as propostas mais inovadoras no campo das configurações interferométricas, como é o caso do cálculo de fase em tempo quasi-real, proposta pelo grupo de investigação da Universidade de Delft, baseiam-se sobretudo na rapidez de cálculo possibilitada pelos desenvolvimentos na área da electrónica de processamento de imagem [2]. Também em Portugal, têm se realizado alguns trabalhos de investigação em *Shearography*, podendo referir-se alguns autores como Santos [2] e Lopes [19], tendo o último desenvolvido um sistema portátil para medição de deformações fora do plano. A configuração apresentada nesta dissertação para o interferómetro de *Shearography* é baseada na montagem proposta por Michelson.

1.4 - Aplicações da Interferometria de *Speckle*

Os interferómetros clássicos como o Michelson e o Mach-Zehnder, são utilizados na medição de pequenas variações de caminho óptico em superfícies polidas ou observadas por reflexões especulares, quer estas sejam planas ou de revolução. A holografia permitiu aplicar as medições interferométricas a objectos tridimensionais com as mais variadas geometrias.

As técnicas de Interferometria Holográfica, e em particular as de Interferometria de *Speckle*, têm vindo a ser utilizadas com sucesso nas áreas da Mecânica Experimental ao longo das últimas décadas. Estas técnicas são totalmente não intrusivas, não destrutivas e permitem a medição global, sem contacto, dos campos de deslocamentos com resolução sub-micrométrica.

A obtenção dos padrões de franjas de interferência pode ser conseguida correlacionando dois registos holográficos de um mesmo objecto mas em duas situações diferentes, isto é, antes e depois de lhe ser aplicada uma carga. Quando a evolução das franjas durante o carregamento do objecto é acompanhada diz-se que a correlação se faz em tempo real, quando o padrão de franjas é obtido por comparação de dois registos distintos trata-se de uma correlação em dupla exposição. Este último método pode ser utilizado em situações estáticas ou quasi-estáticas e em situações dinâmicas e transientes de elevada velocidade quando são utilizados lasers de emissão pulsada. De ambas as técnicas de correlação resultam padrões de interferência com franjas sinusoidais que correspondem a zonas da superfície que sofreram deslocamentos de igual amplitude. A obtenção do valor do deslocamento verificado passa pelo cálculo da fase do padrão de franjas e pelo conhecimento prévio do vector de sensibilidade do interferómetro utilizado.

Por sua vez, o vector sensibilidade depende da orientação dos feixes de iluminação do objecto e da direcção em que este é observado e pode ser orientado de várias formas de acordo com a medição que se pretende realizar. Com uma orientação conveniente da montagem óptica é possível realizar não só a medição do campo de deslocamentos *no-plano* do objecto e *fora-do-plano* deste mas também a medição do campo de deformações [15]. Um exemplo de aplicação destas técnicas em Mecânica Experimental consiste na caracterização do campo de deslocamentos na vizinhança de uma fenda parcial. Trata-se de um problema típico da Mecânica da Fractura em que é necessário caracterizar os deslocamentos *no-plano* e *fora-do-plano* para obter

a informação necessária à determinação do factor de intensidade de tensão desta singularidade geométrica [16]. Na figura 1.1 estão representados os campos de deslocamentos obtidos com Holografia-TV *no-plano* e *fora-do-plano* na vizinhança de uma fenda de penetração parcial.

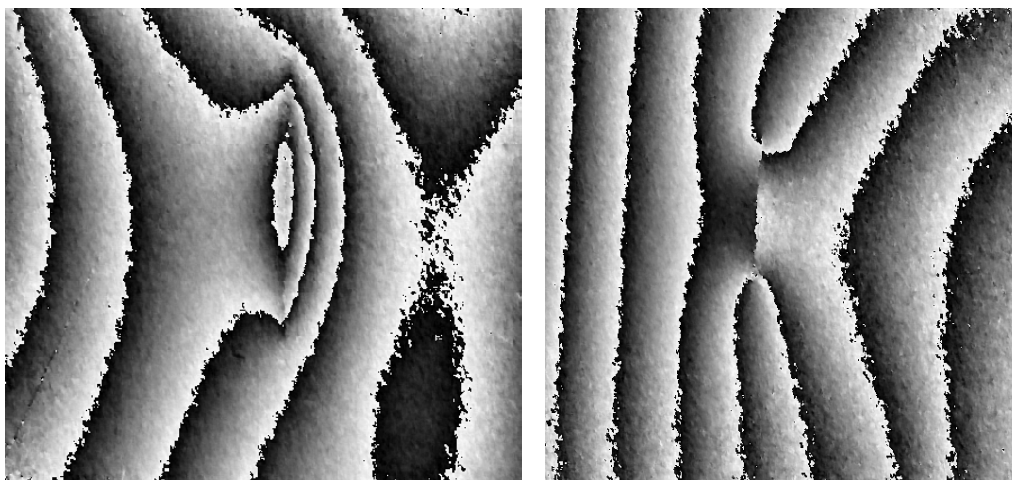


Figura 1.1 - Medição do campo de deslocamentos *no-plano* e *fora-do-plano* na vizinhança de uma fenda de penetração parcial numa placa submetida a tracção no plano segundo a direcção normal ao plano da fenda [2].

A técnica vulgarmente designada por *Shearography* é uma variação da configuração interferométrica clássica da Holografia-TV. Aqui, um único feixe é utilizado na iluminação do objecto sendo a imagem deste, recolhida por um sistema óptico, dividida em duas frentes de onda de igual amplitude e sobrepostas sobre o foto-detector transladadas lateralmente uma em relação à outra, *sheared*. Estas duas frentes de onda interferem sobre o sensor de imagem da câmara de vídeo produzindo um padrão de interferência que é registado electronicamente. Obtém-se assim o registo holográfico. Da correlação entre um par de registos holográficos resulta um padrão de interferência no qual cada franja representa um contorno de igual gradiente de deslocamento na direcção normal ao plano. Quer isto dizer que se trata de uma técnica sensível à deformação da superfície que é obtida da derivada do deslocamento [2].

A *Shearography* foi inicialmente proposta como uma forma de determinar o campo de deformações de estruturas em solicitação estática sem necessidade de recorrer à derivação numérica do campo de deslocamentos [17]. A simplicidade da montagem óptica e o facto de se tratar de um interferómetro em que ambos os braços têm um percurso comum em grande parte do seu caminho, permite obter montagens compactas e com elevada estabilidade mecânica. Este facto, aliado à possibilidade de detectar facilmente gradientes de deslocamento com uma baixa sensibilidade a movimentos de corpo rígido, fez com que esta técnica tivesse enorme divulgação no Controlo Não-Destrutivo.

As imagens da figura 1.2 ilustram uma aplicação desta técnica, na determinação do campo de deformações de um componente aeronáutico, para identificar zonas com defeitos estruturais internos provocados por impactos com corpos rígidos. A estrutura em estudo, parte de uma fuselagem construída em material compósito, correspondendo à cobertura traseira de um helicóptero NH90, foi sujeita a impactos de diferentes energias [18].

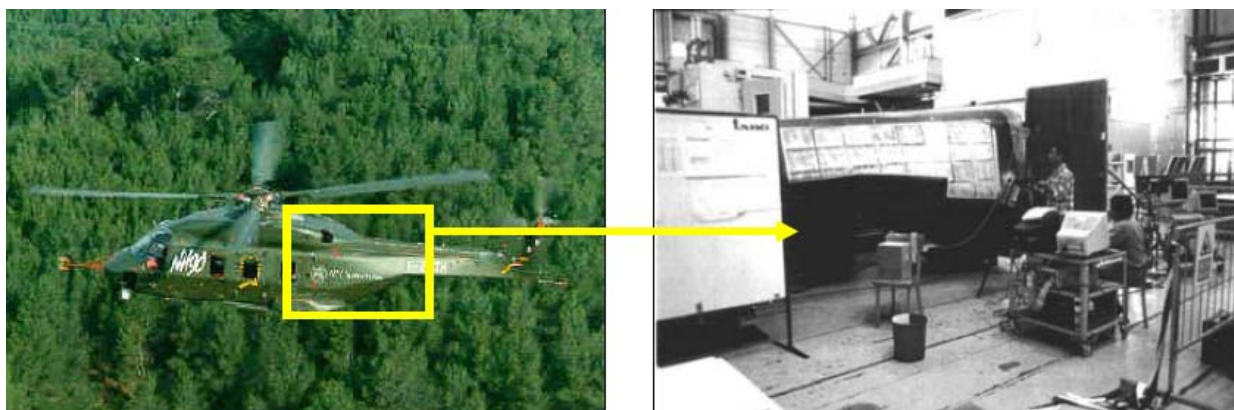


Figura 1.2 - Helicóptero NH-90 e ensaios em estaleiro realizados no IABG na Alemanha sobre a cauda em material compósito utilizando o sistema de *Shearography* desenvolvido no LOME [2].

Na figura 1.3 pode observar-se o mapa de fase obtido numa zona em que existia um conjunto de defeitos internos devido a impactos múltiplos. Neste mapa de fase é possível identificar claramente as regiões em que existem gradientes de deslocamentos devidos a uma deformação não uniforme da superfície.

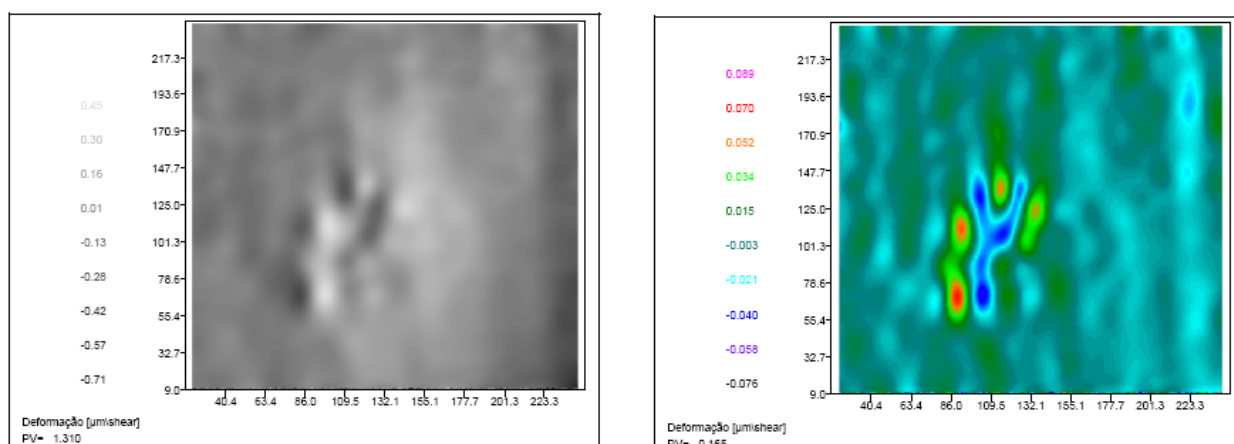


Figura 1.3 - Mapa de fase e mapa de fase codificado em falsa cor obtidos para uma área onde existe um conjunto de defeitos provocados por múltiplos impactos num componente em material compósito [2].

Do que anteriormente foi dito pode concluir-se que as técnicas de Interferometria de *Speckle* são técnicas de elevada resolução e de fácil aplicação, com elevado potencial para aplicações no âmbito da Mecânica Experimental [2].

1.5 - Referências

1. Hecht, Eugene. *Óptica*. s.l. : Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.
2. Santos, Fernando. Novos Métodos de interferometria de *Speckle*. *Tese de Doutoramento*, Porto : FEUP, 2003.
3. Young, Thomas. *On the theory of light and colors*. s.l. : Royal Society , 1802.
4. Villate, Jaime E. Teorias da luz. Tese de Mestrado, FEUP Porto 2005.
5. A., Yariv. *Quantum electronics* . s.l. : Jonh Wiley & Sons, 1979.
6. T. H., Mainman. *Stimulated optical radiation in Ruby*. s.l. : Nature, 1960.
7. Gabor, Dennis. Microscopy by reconstructed wave-fronts. 1949.
8. Butters, J.N. aplicacions of Holography to instrument diaphragm deformation and associated topics. Cambridge university press, 1970.
9. Smigielski, P. Holographie industrielle. Edições Teknea, 1994.
10. W., Fry. silicon photodiode Array. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. Vol. Volume 8.
11. Vaz, Mario e Santos, Fernando. Shearography with pulsed lasers. IRF, 1999.
12. INCA. 6th Framework RTD project. 2001.
13. Stetson, R.L. Powell and K.A *Interferometric vibration analysis by wave-front reconstruction*, 1965.
14. Vaz, Mario Augusto Pires. Interferometria Laser e Metodos Hibridos em Mecânica Experimental. Tese de Doutoramento, Porto FEUP, 1995,
15. Slettemoen, O. Lockberg & G. *Basic electronics speckle pattern interferometry*. s.l. : Applied Optics and Optical Engineering, 1987.
16. Monteiro, J., et al. *Use of Interferometric techniques for measuring the displacement field in the plane of a part-through crack existing in a plane*. s.l. : Int. Journ. Of Pressure Vessels and Piping, 2001.
17. Taylor, Y. Hung & C. *A tool for measurement of derivatives of surface displacement*. s.l. : SPIE, 1973.
18. EUCLID. *CEPA 3 RTP3.1 WP200 Damage detection methods*. 1996.
19. Lopes, Hernâni. *Desenvolvimento de Técnicas Interferométricas, Contínuas e Pulsadas, Aplicadas à Análise do Dano em Estruturas Compósitas*. Tese de Doutoramento, Porto : FEUP, 2007

Capítulo 2 - Técnicas de Interferometria e Processamento de Imagem

2.1 - Interferometria

A possibilidade de utilizar a natureza ondulatória da luz para medir quantidades macroscópicas é conhecida desde há muito. Uma das primeiras observações da interferência da luz foi registada por Isaac Newton [1]. Mais tarde foi Young quem realizou a experiência que revela directamente o carácter ondulatório da luz [2]. Desde então diversas configurações de interferómetros foram desenvolvidas, Michelson, Mach-Zehnder, Sagnac...

A maior parte destes interferómetros foram utilizados na indústria óptica por serem excelentes ferramentas para a determinação da qualidade dos produtos tais como espelhos, lentes e superfícies ópticas em geral. Estes objectos especulares viam as suas superfícies serem comparadas interferometricamente com superfícies perfeitamente conhecidas.

Para além do desenvolvimento verificado nas fontes luminosas, através dos *lasers*, a introdução do processamento electrónico de dados permitiu digitalizar os registos holográficos e analisá-los através de técnicas de tratamento de imagem. Esta vantagem passou a ser utilizada plenamente a partir da década de 70 com o desenvolvimento das técnicas de Interferometria de *Speckle*. Nestas técnicas o registo da informação da superfície do objecto em estudo é realizado directamente em vídeo através da gravação de padrões de *speckle*. O desenvolvimento de sistemas de medida baseados nestas técnicas e a sua interacção com problemas de Engenharia em muito beneficiou a Mecânica Experimental. A grande sensibilidade da interferometria, permitindo medir deslocamentos da ordem da fracção de micrómetro, associada à possibilidade de trabalhar sobre superfícies opacas, com pouca preparação prévia, faz com que a Interferometria de *Speckle* tenha vindo progressivamente a ocupar o lugar de alguns métodos clássicos. A aplicação da Interferometria de *Speckle* pode ser a solução para um número elevado de problemas ligados à engenharia fora de ambientes laboratoriais.

A interferometria de *speckle* é uma técnica de medida sem contacto que pode ser usada para medir o deslocamento de pontos da superfície de um objecto difuso com uma precisão na ordem do comprimento de onda da radiação coerente usada na iluminação. Esta técnica, ao contrário da Interferometria Holográfica, não se baseia na interferência coerente de frentes de onda emitidas por um mesmo objecto, mas na correlação das distribuições de intensidade de padrões de *speckle* [3].

A interferometria de *Speckle* será aqui considerada como o termo geral que engloba as configurações ópticas que utilizam os padrões de *speckle* para codificar informação acerca da superfície de um objecto. Os

primeiros registos de interferometria de *speckle* eram baseados em meios fotográficos mas foi com a introdução do registo em vídeo que estas técnicas adquiriram maior divulgação. Esta modificação do meio de registo, devido à sua menor resolução, implicou a alteração da configuração óptica base da Interferometria Holográfica. Com o aparecimento dos CCD's estas técnicas passaram exclusivamente a utilizar estes sensores para registo de informação. As técnicas de interferometria de *speckle* baseadas em CCD podem agrupar-se em:

- Holografia-TV (para medições de deslocamento no plano e fora do plano)
- *Shearography* (para medições de gradientes de deslocamento no plano e fora do plano).

2.1.1 - O *Speckle*

Os padrões granulares de difracção que viriam a ser conhecidos por *speckle* têm uma história curiosa na óptica [4]. Antes da invenção do laser, o *speckle* era visto essencialmente como uma curiosidade científica que apoiava a teoria ondulatória da luz [5].

As técnicas de interferometria *laser* estão associadas aos fenómenos que envolvem padrões de granitado *laser* (padrões de *speckle*). Os primeiros trabalhos com um *laser* contínuo (He-Ne, 1961) puseram em evidência este fenómeno. Com efeito, a imagem da superfície de um objecto iluminado por um *laser* adquire uma aparência granular, cujas dimensões de grão e distribuição espacial dependem do observador, da posição deste e dos níveis de iluminação. Apesar de, em muitas situações, o fenómeno de *speckle* poder ser considerado como ruído, os grãos que o constituem são portadores da informação de fase da frente de onda, onde está codificada a informação relativa ao estado da superfície de um objecto [3].

Um observador ao olhar para uma superfície rugosa iluminada por uma luz laser vê um padrão de pequenas áreas claras e escuras, que se movem à medida que o observador se move, mas que parece estar sempre focado, independentemente da acomodação do olho do observador. Cada um dos elementos microscópios que constitui a superfície dá origem a uma onda difractária coerente. No entanto, os caminhos ópticos de elementos vizinhos exibem diferenças aleatórias as quais podem chegar a vários comprimentos de onda. Assim, quando as ondas difractadas desses elementos interferem uns com os outros, forma-se um padrão granular estacionário, denominado padrão de *speckle* sendo cada grão um *speckle*. A sua ocorrência é baseada no fenómeno da interferência registada no plano de detecção do observador, neste caso a retina. Se a fonte de luz não for coerente, há uma integração temporal que origina uma imagem uniforme e sem granitado [5]. Na figura 2.1 pode observar-se uma imagem de uma superfície rugosa.

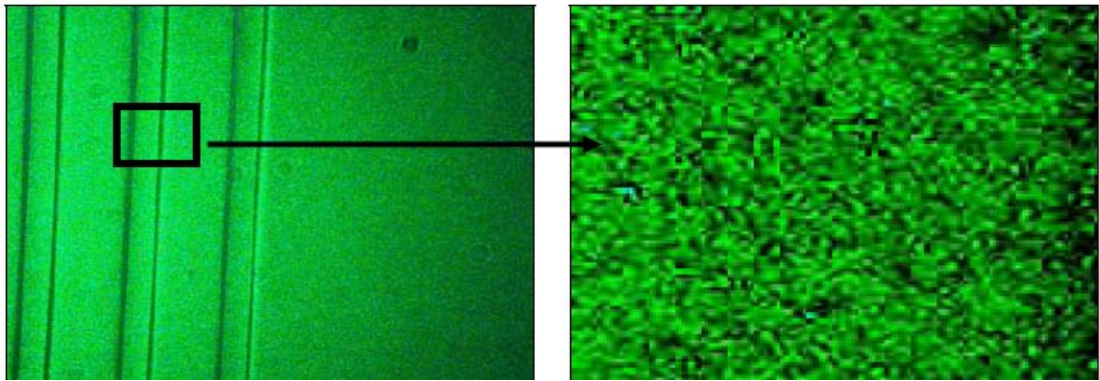


Figura 2.1 - Superfície rugosa de um objecto iluminada por luz coerente, ampliação mostrando a estrutura do *speckle* [3].

A diferença na dimensão dos grãos de *speckle* não depende da rugosidade da superfície, mas sim da resolução do sistema óptico que forma a imagem, ou seja, no caso de uma lente, a sua abertura numérica.

2.1.1.1 - O brilho do *speckle*

Para o aparecimento de *speckle*, têm de ser satisfeitas duas condições. O objecto tem de ser iluminado com uma fonte de luz coerente. Em segundo lugar, o comprimento de correlação da rugosidade da superfície dos objectos tem de estar dentro da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda da luz usada. As superfícies da maioria dos materiais são extremamente rugosas na escala do comprimento de onda óptico ($\lambda=5 \cdot 10^{-7} \text{m}$).

O estudo das propriedades estatísticas do padrão de *speckle* passa pela determinação das funções densidade de probabilidade do campo complexo da intensidade e da fase, pois na maioria das experiências ópticas é a intensidade da radiação que é medida.

Considere-se que um objecto com uma superfície difusora é iluminado e observado num plano detector através de um sistema óptico centrado, como se pode ver na figura 2.2. Na parte posterior do sistema óptico é introduzido um diafragma.

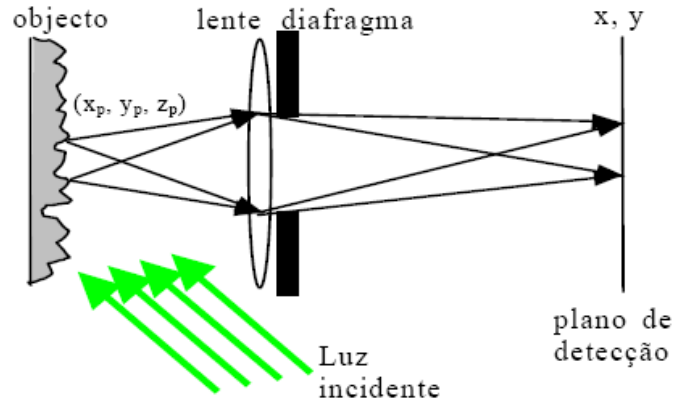


Figura 2.2 - Formação de *speckle* subjectivo através de um sistema óptico formador de imagem [3].

Segundo o princípio de Huygens, cada ponto da superfície do objecto, que é iluminado coerentemente, comporta-se como uma fonte de emissão esférica secundária, cujo campo eléctrico se pode descrever como:

$$E_n(r_n) = \frac{A_n}{r_n} e^{i(kr_0 + \phi_n)} \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad \text{Equação 2.1}$$

em que n representa o ponto emissor da superfície difusa da luz e N é o número total de emissão de luz na superfície. A dependência temporal é aqui emitida pois a diferença de fase entre os trens de onda emitidos é temporalmente constante [6]. A fase ϕ_n , sofre uma forte variação de ponto para ponto. Assim, num dado ponto no espaço, (x, y) , todas as contribuições energéticas da superfície se somam segundo a seguinte equação:

$$E_n(x, y) = \sum_{n=1}^N \frac{A_n}{r_n} e^{i(kr_0 + \phi_n)} \quad \text{Equação 2.2}$$

onde r_n é a distância do ponto da superfície considerado até ao ponto genérico (x, y) . O somatório desta equação é análogo ao somatório existente no problema clássico do passeio aleatório a duas dimensões. Cada onda esférica pode ser representada por um vector no plano complexo, sendo o campo resultante dado pelo somatório complexo dos vectores. Como não existe qualquer relação entre a área de emissão elementar de uma superfície rugosa e as outras e entre a intensidade de cada vector de difusão e a sua fase, a magnitude do campo eléctrico pode ser descrita por:

$$E_n(r_n) = \frac{1}{\sqrt{N}} |A_N| e^{i(\phi_n)} \quad \text{Equação 2.3}$$

em superfícies difusas de luz, a amplitude e a fase ϕ_n de cada onda são estatisticamente independentes uma da outra. Além disso, a fase ϕ_n encontra-se uniformemente distribuída no intervalo $[-\pi; \pi]$ [3]. Estes pressupostos são fisicamente justificados pela distribuição aleatória das áreas elementares da superfície. Assim, a intensidade

e a fase do padrão de *Speckle* podem ser considerados como estatisticamente independentes, onde a fase do padrão de *Speckle* $P_\phi(\phi)$ segue uma distribuição normal do tipo:

$$P_\phi(\phi) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} & \text{se } -\pi < \phi < \pi \\ 0 & \text{se } \phi \geq \pi \text{ ou } \phi < -\pi \end{cases} \quad \text{Equação 2.4}$$

Por outro lado, a densidade de probabilidade da intensidade do padrão de *Speckle* $P_I(I)$ obedece a uma distribuição estatística exponencial negativa definida por:

$$P_I(I) = \begin{cases} 0 & \text{se } I \leq 0 \\ \frac{1}{2\sigma^2} e^{-\frac{I}{2\sigma^2}} & \text{se } I > 0 \end{cases} \quad \text{Equação 2.5}$$

onde σ^2 é a variância. Considerando que o valor médio da intensidade I é igual a $2\sigma^2$ e recorrendo ao cálculo da variância da intensidade σ_I^2 verifica-se que o desvio padrão σ_I é igual à intensidade média, em que o contraste V é definido por:

$$V = \frac{\sigma_I}{\langle I \rangle} \quad \text{Equação 2.6}$$

Desta relação pode concluir-se que o contraste de um padrão *Speckle* completamente polarizado é 1 [7].

O brilho mais provável para um *speckle* é zero, isto é, existem mais grãos escuros do que grãos de *speckle* de qualquer outra cor. Se dois campos independentes de *speckle* se sobrepuserem, a probabilidade de se encontrarem grãos de *speckle* sem brilho tende para zero [3].

2.1.1.2 - O Tamanho de *speckle*

O tamanho do *speckle* no plano de imagem depende, então, da abertura numérica do sistema óptico. Se a abertura da lente diminui, o tamanho do *speckle* aumenta, e vice-versa. Este facto é apresentado na figura 2.3.

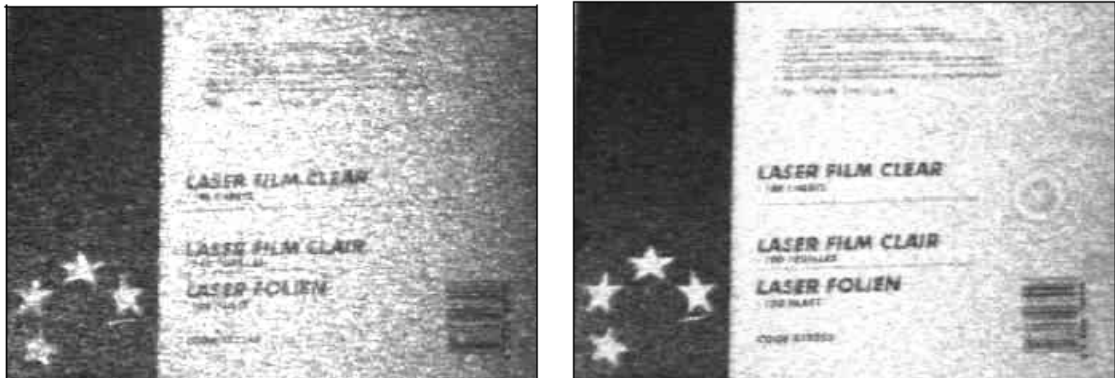


Figura 2.3 - Imagem de um objecto iluminado com um *laser* através de um sistema óptico de abertura f/8 e f/16 [3].

A máxima frequência espacial, $f_{m\acute{a}x}$, no padrão de *speckle* é dada pelo tamanho da lente (abertura), e a distância da lente ao plano de observação:

$$\frac{1}{f_{\max}} = \frac{\lambda z}{D} \quad \text{Equação 2.7}$$

O tamanho médio do *speckle*, d_s , é dado pelo primeiro mínimo da função de Bessel:

$$d_s = \frac{1.22 \lambda z}{D_l} \quad \text{Equação 2.8}$$

O tamanho do *speckle* no plano de imagem pode ser relacionado com a abertura numérica do sistema óptico, que é dada por:

$$NA = \sin(\theta_i) \cong \tan(\theta_i) = \frac{D_l}{2f} \quad \text{Equação 2.9}$$

em que θ_i representa o ângulo de convergência no espaço imagem e f é a distância focal da lente. Como $z = f$, no plano de imagem, o tamanho do *speckle* pode tomar a seguinte forma:

$$d_s = 0.61 \frac{\lambda}{NA} \quad \text{Equação 2.10}$$

Em conclusão pode considerar-se que os padrões de *speckle* são um conjunto de redes aleatórias com frequência espacial variável que codificam a informação da superfície, sendo a máxima frequência imposta pelo sistema óptico [7]. Do ponto de vista da Mecânica Experimental dois parâmetros são importantes. Em primeiro, e mais importante, o padrão de amplitude no plano de imagem está correlacionado de uma maneira única com as propriedades da superfície iluminada. Para pequenos deslocamentos no plano, o padrão de *speckle* mantém-se agarrado ao relevo da superfície, mesmo sendo esta deformada. Na direcção fora do plano o padrão de *speckle* é como que esticado e é relativamente insensível a este tipo de deslocamento. O segundo parâmetro importante para as aplicações em Mecânica Experimental é o de que o tamanho dos grãos de *speckle* no plano de imagem é determinado pelo sistema óptico e pelo comprimento de onda da iluminação, equação 2.5. Assim, é possível ajustar opticamente o sistema formador de imagem para que o tamanho dos grãos de *speckle* seja compatível com o tamanho dos *pixels* de um detector CCD [3].

Cada *pixel* é o responsável, num sistema bem ajustado, pela informação referente a um grão de *speckle*. Por sua vez, dada a sua natureza, um padrão de *speckle* é constituído por grãos cuja fase é independente entre si e varia aleatoriamente. São assim gerados os padrões de interferência primária onde fica registada a distribuição espacial da intensidade do padrão de *speckle* obtido da sobreposição da imagem da superfície com a frente de onda de referência. Este padrão é convertido numa matriz de intensidade pelo CCD e guardado numa memória digital de imagem. Os padrões de interferência contendo a informação sobre a deformação da superfície do objecto são obtidos correlacionando padrões de *speckle* primários obtidos para diferentes estados do objecto. Estas franjas são designadas por secundárias e contêm a informação pretendida. Embora estes padrões

apresentem muito ruído de *speckle*, dada a ausência de modulação na maior parte dos grãos e a contribuição da fase aleatória, globalmente contribuem para o aparecimento de uma distribuição de franjas em tudo idêntica à distribuição obtida por Interferometria Holográfica.

2.1.2 - Correlação

O primeiro trabalho baseado no sistema de fotografia do *speckle* foi apresentado em 1980 por Peters e Ranson [8]. As imagens são registadas por um detector CCD e armazenadas, em frames separados, no computador. As imagens antes e após o carregamento estão em diferentes quadros, e é possível utilizar um algoritmo de correlação cruzada para determinar o campo de deslocamentos. O resultado obtido é muito mais rápido já que não é necessário nenhum filme de transformação ou reconstrução com luz laser [9].

Sempre que uma superfície com rugosidade superior ao comprimento de onda da luz de iluminação do objecto é iluminada por uma radiação coerente origina um padrão de *speckle*. Este padrão de *speckle*, designado por objectivo, pode ser registado através de um sistema óptico, dando origem a um padrão subjectivo, pois é condicionado pelas características geométricas do sistema formador de imagem. Se a um padrão de *speckle* obtido desta forma for sobreposto um outro padrão coerente, ou uma frente de onda com uma distribuição constante de fase, forma-se um outro padrão contendo informação de fase. Estes padrões de *speckle* são designados por padrões de interferência primária e não apresentam qualquer informação visual relevante devido à presença de uma fase aleatória característica do fenómeno de *speckle*. Da correlação de dois padrões de *speckle* primários, sendo um registado antes da deformação e outro após a deformação, obtém-se um padrão de interferência secundário. O padrão resultante contém uma informação de fase devida às alterações verificadas na superfície do objecto sobreposta à variação aleatória de fase. Os métodos de determinação de fase na interferometria por correlação de *speckle* baseiam-se no facto de que quando um objecto se desloca altera a fase do *speckle*. Sendo possível medir a fase entre duas posições finitas, o posicionamento do objecto pode ser rigorosamente determinado.

As franjas secundárias contêm a informação relevante sobre o objecto. Estas franjas começaram por ser obtidas por adição, sendo os primeiros interferogramas obtidos em *time-average* e filtragem electrónica. Com o surgimento dos primeiros sistemas de processamento de imagem, a subtracção tornou-se numa forma alternativa de conseguir franjas secundárias, permitindo melhorar significativamente o contraste dos interferogramas. Isto deve-se sobretudo à eliminação do termo de autocorrelação (invariável com a deformação do objecto) ao efectuar-se a subtracção das duas imagens. Apesar de apresentar resultados com mais ruído e com um contraste inferior a correlação por adição foi utilizada durante muito tempo no estudo de fenómenos rápidos. Quando é necessário utilizar este tipo de correlação recorre-se à filtragem electrónica para remoção do termo invariante. Actualmente com o aparecimento de CCD's de dupla-exposição assíncrona, esta necessidade deixou de existir. Na verdade estes novos CCD's permitem que a correlação por subtracção se possa efectuar mesmo no estudo de fenómenos rápidos [3].

2.1.2.1 - Correlação de padrões de *speckle* por subtração

Numa configuração de Interferometria de *speckle* é fácil quantificar a intensidade de cada *pixel* do detector de CCD após sobreposição de duas frentes de onda. Considerando que a lente foca a imagem no alvo CCD, a intensidade de cada *pixel* pode ser considerado proporcional à intensidade de cada ponto de imagem da superfície do objecto. A amplitude de dois campos eléctricos que interferem num determinado ponto (x,y) do plano do CCD adicionam-se. A intensidade do sinal é proporcional ao quadrado da amplitude e obtida a partir de:

$$I = |E|^2 = E \cdot E^* \quad \text{Equação 2.11}$$

onde E^* representa o valor complexo conjugado da amplitude de campo, E pode-se então, a partir desta equação, obter-se a intensidade luminosa de cada pixel no plano do detector CCD.

$$I = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos \Phi \quad \text{Equação 2.12}$$

com $\Phi = \varphi_2 - \varphi_1$. Sendo φ_1 e φ_2 as fases relativas de cada uma das frentes de onda que interferem. A intensidade varia, entre os valores extremos do máximo e do mínimo.

A intensidade em cada ponto é função da intensidade média da modulação e da fase. Cada um destes parâmetros é variável de acordo com as suas coordenadas. A equação apresenta-se da seguinte forma:

$$I_{(x,y)} = I_{0(x,y)}(1 + M_{(x,y)} \cos(\Phi_{(x,y)})) \quad \text{Equação 2.13}$$

A interferência que ocorre no plano do CCD é registada. A este registo do padrão de *speckle* corresponde a posição da superfície num dado instante. Se o objecto sofrer uma deformação o padrão de *speckle* será alterado a nível microscópico. Este segundo padrão de *speckle* pode ser registado e posteriormente correlacionado com o anterior.

2.1.2.2 - Formação de franjas por correlação de *speckle*

A formação de franjas de interferência em sistemas de interferometria por correlação de *speckle* pode ser sensível a deslocamentos no plano, deslocamentos fora do plano ou a gradientes de deslocamento fora do plano. Nesta descrição será considerada uma ampliação unitária das imagens, para maior simplicidade [33]. As frentes de onda que interferem, constituindo os interferogramas primários, são designadas por u_a e u_b . A distribuição de intensidade I detectado no plano de imagem é dada por:

$$I = |\mathbf{u}_a + \mathbf{u}_b|^2 = I_a + I_b + \mathbf{u}_a \mathbf{u}_b^* + \mathbf{u}_a^* \mathbf{u}_b \quad \text{Equação 2.14}$$

onde $I_a = |\mathbf{u}_a|^2$ é igual a I na ausência de \mathbf{u}_b e $I_b = |\mathbf{u}_b|^2$ é igual a I na ausência de \mathbf{u}_a . Introduzindo os índices 1 e 2 referentes, respectivamente, aos estados do objecto antes e após deformação e considerando os valores médios, o padrão de franjas de correlação média pode ser determinado através de:

$$\langle (I_a - I_b) \rangle = \langle I_1^2 \rangle + \langle I_2^2 \rangle - 2\langle I_1 I_2 \rangle \quad \text{Equação 2.15}$$

Considerando que:

- u_a é de *speckle* e u_b pode sê-lo, também,
- u_a e u_b são independentes,
- $\langle I_{a1} \rangle = \langle I_{a2} \rangle = \langle I_a \rangle$ e da mesma forma para b

$$\quad \text{Equação 2.16}$$

obtem-se as seguintes equações:

$$\langle I_1 \rangle = \langle I_2 \rangle = \langle I_a \rangle + \langle I_b \rangle \quad \text{Equação 2.17}$$

$$\langle I_1^2 \rangle = \langle I_2^2 \rangle = \langle I_a^2 \rangle + \langle I_b^2 \rangle - 4\langle I_a \rangle \langle I_b \rangle \quad \text{Equação 2.18}$$

$$\langle I_1 I_2 \rangle = \langle I_{a1} I_{a2} \rangle + \langle I_{b1} I_{b2} \rangle + 2\langle I_a \rangle \langle I_b \rangle \Re\{\langle \mathbf{u}_{a1}^* \mathbf{u}_{a2} \rangle \langle \mathbf{u}_{b1}^* \mathbf{u}_{b2} \rangle\} \quad \text{Equação 2.19}$$

Para além disso, como a intensidade dos padrões de *speckle* obedece a uma estatística exponencial negativa, pode considerar-se que:

$$\langle I_a^2 \rangle = 2\langle I_a \rangle^2 \quad \text{Equação 2.20}$$

Uma expressão semelhante pode ser deduzida para I_b se u_b for de *speckle*. Assim, no caso de um padrão de interferência perfeitamente correlacionado (a mesma polarização, coerentes e com a mesma amplitude), o termo de interferência terá a seguinte forma:

$$\langle I_1 I_2 \rangle = \langle I_a^2 \rangle + \langle I_b^2 \rangle + 2\langle I_a \rangle \langle I_b \rangle \cos(\Delta\phi_b - \Delta\phi_a) \quad \text{Equação 2.21}$$

onde $\Delta\phi_a$ e $\Delta\phi_b$ são as diferenças de fase introduzidas nas frentes de onda u_a e u_b pelo carregamento do objecto e por eventuais modulações de fase.

O padrão de franjas de correlação médio pode ser descrito por:

$$\langle (I_2 - I_1)^2 \rangle = 4\langle I_a \rangle \langle I_b \rangle [1 - \cos(\Delta\phi_b - \Delta\phi_a)] \quad \text{Equação 2.22}$$

Esta expressão descreve um padrão de franjas perfeitamente correlacionado de visibilidade unitária. No caso de um padrão de franjas completamente descorrelacionado e em que u_a e u_b são de *speckle* e descorrelacionam sob acção da deformação, a equação (2.34) permite deduzir que:

$$\langle I_1 I_2 \rangle = (\langle I_a \rangle + \langle I_b \rangle)^2 = \langle I_a \rangle^2 + \langle I_b \rangle^2 + 2\langle I_a \rangle \langle I_b \rangle \quad \text{Equação 2.23}$$

O que conduz a:

$$\langle (I_2 - I_1)^2 \rangle = 2(\langle I_a \rangle + \langle I_b \rangle)^2 \quad \text{Equação 2.24}$$

Numa medição deverá evitar-se a completa descorrelação entre os padrões de *speckle* sob pena de se obter um padrão de franjas de visibilidade nula. Petterson [33] apresenta uma expressão que permite determinar o coeficiente de correlação, c , que é função do vector sensibilidade k_i e k_o , do deslocamento d_o , da rotação da superfície γ e da função pupila do sistema óptico $P(f)$. O valor de c situa-se entre 0 (descorrelação completa) e 1 (correlação total). Num padrão de *speckle* parcialmente descorrelacionado o termo de interferência toma a seguinte forma:

$$\langle I_1 I_2 \rangle = \langle I \rangle^2 \cdot (1 + |c|^2) \quad \text{Equação 2.25}$$

Em que,

$$c = \frac{1}{A} \int P(f) \cdot P(f - f_t) \cdot \exp(-2\pi i f \cdot d_{o\perp}) \cdot df \quad \text{Equação 2.26}$$

De acordo com o tipo de frentes de onda que interferem, uma de *speckle* e outra especular ou ambas de *speckle*, assim teremos um comportamento diferente para o interferómetro. Não só a informação gravada no padrão de franjas é diferente como também apresenta uma diferente sensibilidade à descorrelação. Pode então dividir-se os interferómetros de *speckle* em dois grupos:

- Interferómetros em que apenas uma das frentes de onda é um padrão de *speckle*, sendo a outra obtida por reflexão especular. Esta última tem uma distribuição constante de fase.
- Interferómetros em que ambas as frentes de onda são padrões de *speckle*.

No segundo grupo pode incluir-se o interferómetro com dupla iluminação para medir deslocamentos no plano, o interferómetro para medição de gradientes de deslocamento e um interferómetro para medição de deslocamentos fora do plano [3]. De seguida apresenta-se o conjunto de equações que rege cada um dos interferómetros de *speckle* referidos.

2.1.2.2.1 - Interferómetro sensível a deslocamentos fora do plano

Embora existam duas configurações para realizar este interferómetro apenas será aqui tratado o caso que envolve uma referência especular. Nesta situação apenas a frente de onda u_a descorrelaciona sob acção da deformação. A frente de onda u_b representa o braço de referência. Das equações anteriores pode verificar-se que:

$$\langle (I_2 - I_1)^2 \rangle = 2\langle (I_a) \rangle^2 (1 - |c|^2) + 4\langle I_a \rangle \langle I_b \rangle - 4|c| \langle I_a \rangle \langle I_b \rangle \cos(\Delta\phi + \alpha + \phi_c) \quad \text{Equação 2.27}$$

Em que,

$$\Delta\phi = [(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_0) \cdot \mathbf{d}_0] \quad \text{Equação 2.28}$$

No caso dos vectores de onda da iluminação e de observação serem anti-paralelos ao longo do eixo óptico, a variação de fase induzida pela deformação é:

$$\Delta\phi = 2\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{d}_0 = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) d_{0z} \quad \text{Equação 2.29}$$

Na figura 2.4 mostra-se esquematicamente um interferómetro deste tipo. Nesta montagem um divisor de feixe é utilizado para introduzir o feixe de referência no eixo do sistema formador de imagem. De referir que existem muitas soluções para a realização da referência que, neste caso, deverá estar perfeitamente alinhada com o eixo óptico do sistema [3].

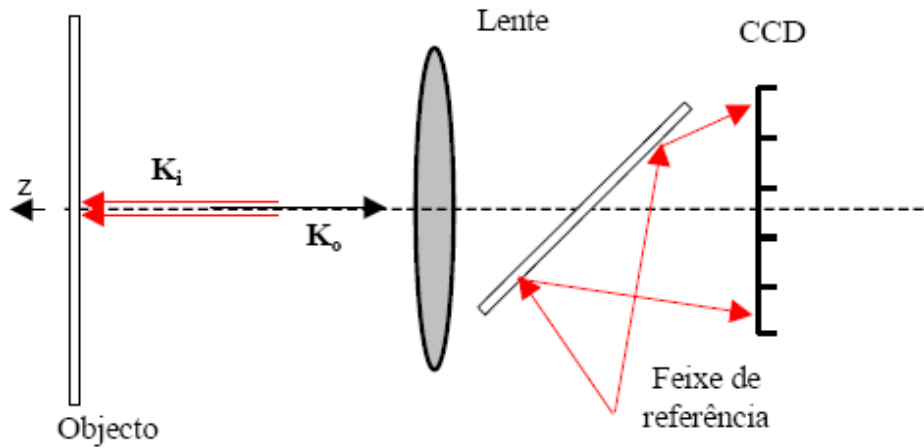


Figura 2.4 - Configuração de um interferómetro de *speckle* para medição de deslocamentos fora do plano [3].

2.1.2.2.2 - Interferómetro sensível aos deslocamentos no plano

Neste tipo de interferómetros, representado na figura 2.5, ambas as frentes de onda provêm do objecto e atravessam o sistema de formação de imagem. Consideremos que as duas frentes de onda são independentes. Sendo assim, as duas frentes de onda u_a e u_b são de *speckle* e descorrelacionam sob acção da deformação. Considerando que u_a e u_b descorrelacionam com o mesmo coeficiente, c , pode escrever-se que [33]:

$$\langle (I_2 - I_1)^2 \rangle = 2(1 - |c|^2)(\langle I_a \rangle + \langle I_b \rangle)^2 + 4|c|^2 \langle I_a \rangle \langle I_b \rangle [1 - \cos(\Delta\phi + \alpha)] \quad \text{Equação 2.30}$$

Onde

$$\Delta\phi = [(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_0) \cdot \mathbf{d}_0]_1 - [(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_0) \cdot \mathbf{d}_0]_2 \quad \text{Equação 2.31}$$

Este termo representa a diferença de fase devida à deformação ocorrida entre a gravação dos dois registos. O valor α na equação anterior representa uma fase constante introduzida propositadamente quando se pretende determinar a fase recorrendo a técnicas de modulação temporal.

Seguindo a formulação apresentada por Petterson [33], é possível obter, para um interferómetro de dupla iluminação, a seguinte equação para descrever o padrão de franjas:

$$\Delta\phi = \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right) \sin(\theta) d_{0x} \quad \text{Equação 2.32}$$

Nesta equação θ é o ângulo entre cada uma das direcções de iluminação e a normal ao plano.

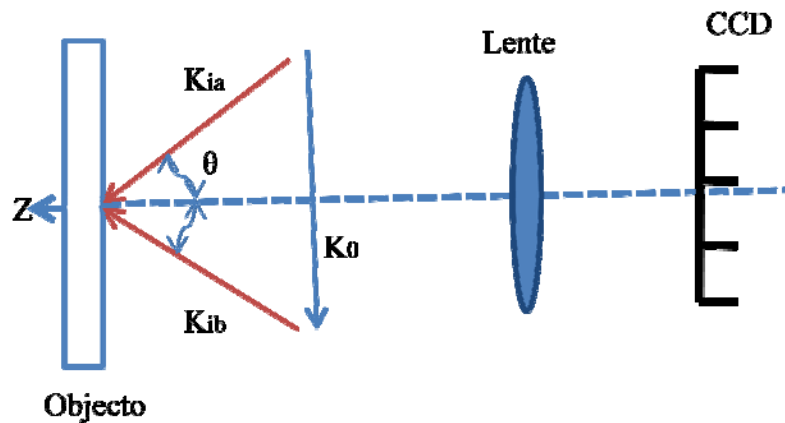


Figura 2.5 – Configuração de um interferómetro de *speckle* para medição de deslocamentos no plano.

Com este tipo de interferómetro é possível medir os deslocamentos ocorridos no plano segundo a direcção do vector de sensibilidade. Este vector, por sua vez, está contido no plano definido pelos dois feixes de iluminação. Como durante a deformação do objecto ambas as frentes de onda sofrem descorrelação este interferómetro é o mais sensível a este problema. Contudo, a utilização de feixes colimados permite reduzir a

sensibilidade à descorrelação na perpendicular ao plano [3]. A técnica de interferometria que utiliza o interferómetro sensível aos deslocamentos no plano é a ***Electronic Speckle Pattern Interferometry*** a qual se descreve de seguida.

2.1.2.2.1 - *Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI)*

Após os trabalhos de Powell e Stetson [11] e Haines e Hildebrand [12], as técnicas de interferometria holográfica foram aplicadas com êxito a uma grande variedade de problemas metrológicos. Contudo, a sua divulgação ficou muito aquém das expectativas geradas pelas potencialidades que esta técnica cedo revelou. Muito da relutância à sua utilização deveu-se ao meio utilizado no registo dos padrões de interferência. A emulsão fotográfica torna o processo de gravação moroso e a necessidade do processamento químico na revelação praticamente restringe a sua utilização aos laboratórios [7].

A substituição da emulsão pela câmara de vídeo no registo dos padrões de interferência foi proposta de uma forma mais ou menos simultânea por três grupos de investigação. Em Inglaterra Butters e Leendertz, nos Estados Unidos Macovsky e na Áustria Schowomma. Ao substituir a emulsão fotográfica, com uma resolução que pode ir até às 3000 linhas por mm, pelo alvo de uma câmara de vídeo cuja resolução é duas ordens de grandeza inferiores, são impostas algumas limitações. A necessidade de aumentar o tamanho de *speckle* para o tornar compatível com a resolução do detector de vídeo implica que o contraste das imagens obtidas seja muito inferior ao obtido em holografia. A informação registada é, no entanto, mais que suficiente para a maioria das aplicações onde é normalmente utilizada a Interferometria Holográfica. Mantendo a maioria das características da holografia, o ESPI (*Electronic Speckle Pattern Interferometry*) tem como principal vantagem a possibilidade de gravar hologramas com a frequência de vídeo (25 imagens por segundo no sistema vídeo europeu e 30 imagens por segundo no sistema americano) sem necessidade de reposicionamento ou processamento químico [7].

Com a evolução tecnológica foram desenvolvidos e aperfeiçoados vários equipamentos que tornaram as técnicas de interferometria holográfica com registo em vídeo acessíveis a qualquer grupo de investigação. Para o processamento e registo dos sinais de vídeo apareceram as memórias digitais compatíveis com o barramento de qualquer computador pessoal. Este hardware permite efectuar subtracções em tempo real, processar as imagens obtidas e armazená-las directamente na memória do computador. Para o registo dos padrões de interferência surgiram as câmaras de CCD (*Charge Couple Devices*) com maior sensibilidade à luz e permitindo imagens com melhor contraste.

Os díodos laser, apesar das suas reduzidas dimensões, têm visto a sua potência aumentada. Com comprimentos de coerência que podem ir até alguns metros e emitindo em frequências dentro do espectro visível, podem considerar-se as fontes de luz estruturada mais ajustada a este tipo de aplicação. A associação das técnicas de processamento de imagem e de modulação de fase permitem recolher e tratar grandes quantidades de informação, pelo que é possível conceber sistemas que facilitem a obtenção e interpretação de resultados obtidos pelas técnicas interferométricas.

O princípio básico de funcionamento do sistema de ESPI convencional não é mais que um feixe laser coerente que é dividido por meio de um divisor de feixe variável em dois braços, cada um dos quais é expandido por intermédio de objectivas microscópicas. Um dos feixes separados é filtrado por um filtro espacial e usado como referencia sendo por isso designado como feixe de referência, enquanto o outro ilumina o objecto de teste designado por isso como feixe do objecto. Para uma mais fácil compreensão é apresentado um esquema do dispositivo na figura 2.6.

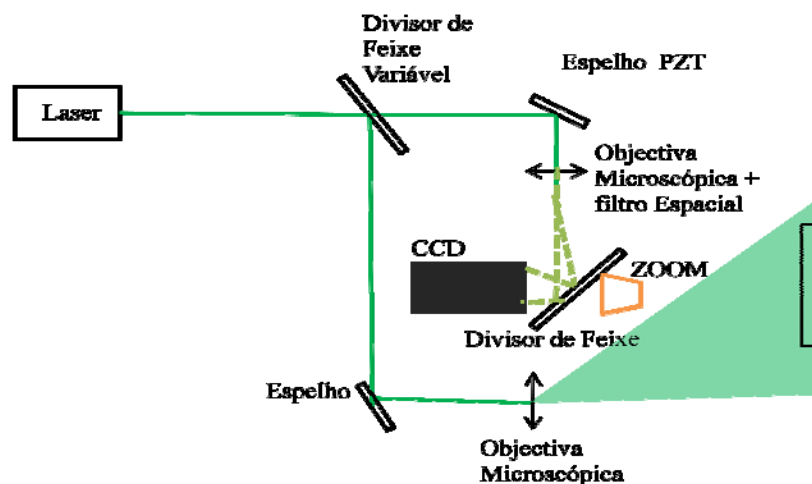


Figura 2.6 - Diagrama esquemático de um sistema de ESPI convencional.

A luz reflectida na superfície do objecto é captada pelas lentes do sistema óptico e combinada com o feixe de referência. O padrão de *speckle* que resulta da interferência dos dois feixes é captado por uma câmara de CCD e armazenado num sistema computadorizado de processamento de imagem digital. Este padrão de *speckle* gravado transporta a informação correspondente à topografia da superfície do objecto de teste. Se um segundo padrão de *speckle* é depois gravado com uma forma da superfície do objecto ligeiramente diferente (tipicamente do tipo da causada por uma tensão no objecto), é possível comparar o par de padrões de *speckle* gravados para extrair a informação relacionada com a deformação do objecto.

2.1.2.2.3 - Interferómetro sensível a gradientes de deslocamento fora do plano (*Shear*)

Nas técnicas anteriores, os dois braços do interferómetro percorrem caminhos distintos antes de se recombinarem. Alterações das condições ambientes como flutuações de temperatura, turbulências de ar ou vibrações poderão influenciar de forma distinta os percursos ópticos de cada um dos feixes. Assim, a diferença de fase entre o feixe objecto e o feixe de referência é influenciada não só pela deformação do objecto em estudo mas também pelas condições de teste. A *Shearography* é uma derivação destas técnicas que permite ultrapassar esta dificuldade, através de uma configuração interferométrica de caminhos ópticos comuns, ou diferencial.

Neste tipo de interferómetro a amplitude do feixe objecto é dividida em dois de forma a gerar um segundo feixe que será o feixe de referência. Posteriormente este é desviado (*sheared*) lateralmente em relação

ao primeiro. Os feixes são recombinados em seguida e feitos incidir num plano detector. Na figura 2.7 está representada a configuração deste tipo de interferómetro: um feixe *laser* ilumina o objecto e cada par de pontos objecto dá origem a um ponto imagem no plano do detector. Este ponto imagem resulta, então, da interferência entre dois pontos objecto distintos.

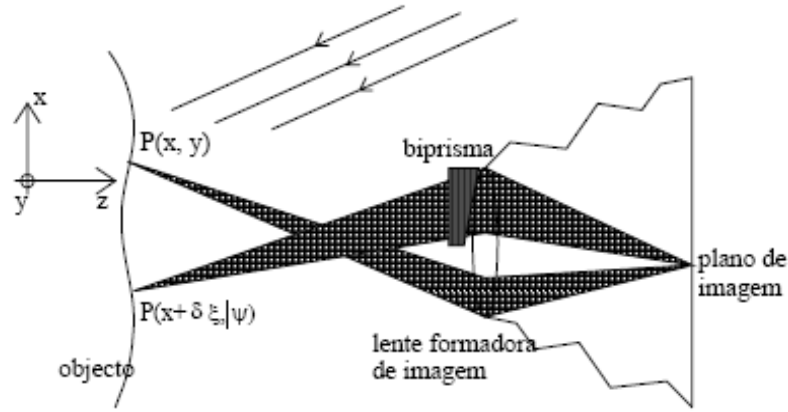


Figura 2.7 - Configuração de um interferómetro de *speckle* sensível ao gradiente de deslocamento fora do plano [3].

A intensidade neste ponto é, por conseguinte, determinada pela intensidade da radiação proveniente de cada um dos pontos e pela diferença de caminhos ópticos. Como os dois feixes percorrem caminhos próximos, sendo a distância lateral máxima da ordem de alguns centímetros, as respectivas fases são perturbadas de forma semelhante pelas condições exteriores. Assim, a diferença de fase entre os dois feixes é pouco sensível a estas perturbações. De referir que os dois feixes podem ser considerados arbitrariamente feixe objecto e feixe de referência.

Apesar de existirem variações, sobretudo quanto à forma como o *Shear* entre imagens é realizado, todos os sistemas de *shearography* são compostos de uma fonte de luz coerente, de um sistema interferométrico de *Shear* de imagens e um detector de imagem (normalmente CCD) [10]. Tudo isto com o objectivo de criar num plano uma interferência resultante da sobreposição de raios difundidos por pares de pontos separados pela mesma distância (*Shear*).

Considere-se que as duas frentes de onda são estocasticamente independentes e que provém do objecto. Sendo assim, as duas frentes de onda u_a e u_b são de *speckle* e descorrelacionam sob acção da deformação. Considerando que u_a e u_b descorrelacionam com o mesmo coeficiente, c , pode escrever-se que:

$$\langle (I_2 - I_1)^2 \rangle = 2(1 - |c|^2)(\langle I_a \rangle + \langle I_b \rangle)^2 + 4|c|^2 \langle I_a \rangle \langle I_b \rangle [1 - \cos(\Delta\phi + \alpha)] \quad \text{Equação 2.33}$$

Onde,

$$\Delta\phi = [(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_0) \cdot \mathbf{d}_0]_1 - [(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_0) \cdot \mathbf{d}_0]_2 \quad \text{Equação 2.34}$$

No caso dos vectores de onda da iluminação e de observação serem anti-paralelos ao longo do eixo óptico e do *Shear* entre imagens ser dado por Δx , a variação de fase induzida pela deformação é:

$$\Delta\phi = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) [\mathbf{d}_{0z}(\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x}, \mathbf{y}) - \mathbf{d}_{0z}(\mathbf{x}, \mathbf{y})] \quad \text{Equação 2.35}$$

No caso de pequenos valores de *Shear*, a equação anterior reduz-se a:

$$\Delta\phi = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) \frac{\partial \mathbf{d}_{0x}}{\partial \mathbf{x}} \Delta\mathbf{x} \quad \text{Equação 2.36}$$

Assim, um deslocamento de corpo rígido do objecto no plano causará a desc correlação dos dois feixes, provocando uma variação de fase uniforme em todo o objecto, mas não originará franjas. Deslocamentos uniformes e locais, induzindo variações não uniformes de fase, originarão franjas [3]. Nesta dissertação dá-se maior importância ao interferómetro de Michelson que está agrupado dentro da categoria dos interferómetros de duas ondas, obtidas por divisão de amplitude.

2.1.2.2.3.1 - O Interferómetro de Michelson

Este interferómetro é basicamente um interferómetro óptico com registo dos padrões de interferência em vídeo. Um sistema de medição interferométrico consiste numa fonte de luz, num sistema óptico (interferómetro) e num detector que converte variações de intensidade luminosa num sinal mensurável [5].

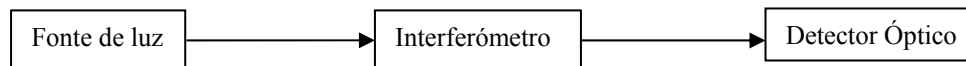


Figura 2.8 – Configuração de um sistema de medição interferométrico.

No entanto a frequência da radiação electromagnética é muito elevada, cerca de 10^{14} [Hz] no visível e próximo do infravermelho, para poder ser observada. A técnica de processamento óptico que transforma a informação de fase em informação de intensidade é chamada interferometria.

Um interferómetro é um sistema óptico para observar interferência entre duas ou mais ondas. Por interferência óptica designa-se interacção ou sobreposição de feixes de luz, da qual resulta uma intensidade que não é simplesmente igual à soma das intensidades componentes. No caso da interferência de duas ondas iguais, esta depende da interferência ser construtiva (em fase) em que a amplitude da onda resultante será o dobro da inicial, ou destrutiva (desfasada de π radianos) em que a amplitude da onda será nula. A amplitude define o máximo valor da onda e a fase representa a posição desse máximo (pico) relativamente à origem. Para se poder observar interferência os feixes recombinados têm de ser coerentes. Em geral, feixes de diferentes fontes não são, em geral coerentes e como tal para a maioria das aplicações os feixes são obtidos da mesma fonte. Existem dois métodos geralmente usados para produzir interferómetros [5]:

- Divisão de frente de onda, de que é exemplo a experiência das fendas de Young.

- Divisão de amplitude, em que o feixe é dividido por uma superfície parcialmente reflectora, de que é exemplo a montagem designada por interferómetro de Michelson.

Uma frente de onda separada em duas partes percorre dentro do interferómetro caminhos ópticos distintos, os braços do interferómetro; à saída, as duas ondas são recombinadas dando origem a figuras de interferência. Visto que a observação das figuras de interferência só é possível com ondas mutuamente coerentes, a luz utilizada no interferómetro é proveniente de uma única fonte. Na figura 2.9 representa-se esquematicamente uma das configurações mais utilizadas na realização deste tipo de interferómetro.

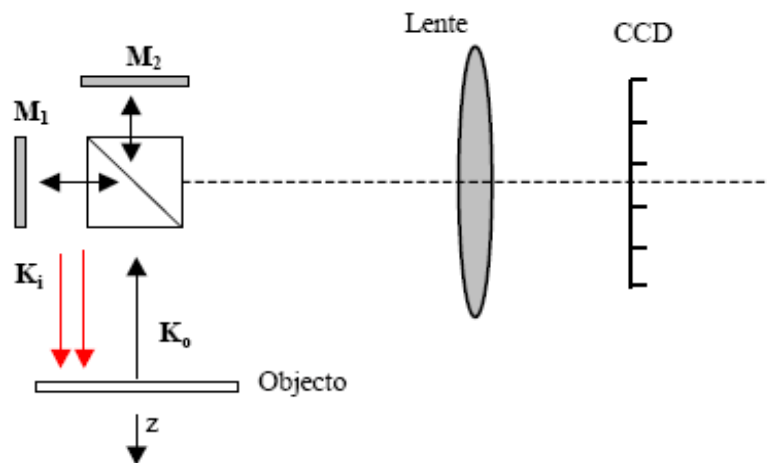


Figura 2.9 - Interferómetro de Michelson para medições de gradientes de deslocamento fora do plano [3].

Tal como se pode ver na figura 2.10, a luz vinda de uma fonte de luz, é dividida em amplitude no divisor de feixe. Desta forma são obtidos um feixe de referência e outro de sinal, com caminhos ópticos separados espacialmente. Estes feixes, são então reflectidos nos espelhos e recombinados do divisor de feixe, após percorrerem dentro do interferómetro caminhos ópticos distintos. Estes caminhos constituem os braços do interferómetro. No plano da imagem, as duas ondas parciais recombinadas dão origem a figuras de interferência, permitindo medir a diferença de fase entre ambos os braços.

A primeira aplicação deste interferómetro foi à medição de comprimentos de onda, especialmente da estrutura de linhas espectrais. Na figura 2.10 representa-se o padrão de interferência típico, ou interferograma, de duas ondas planas ligeiramente inclinadas segundo a horizontal.

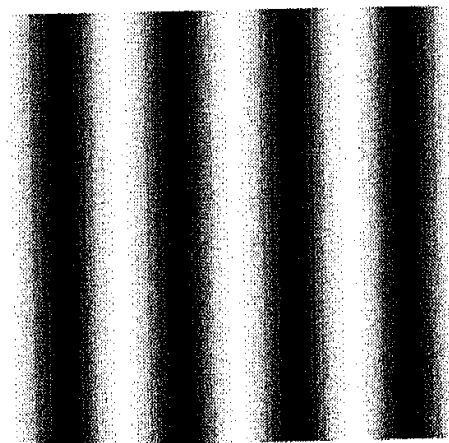


Figura 2.10 – Interferência de duas ondas planas [5].

O interferômetro de *Michelson* sensível a gradientes de deslocamento fora do plano é assim utilizado na técnica de interferometria *Shearography*, que se descreve de seguida.

2.1.2.2.4 - Shearografia

Shearografia [14], também designada por de interferometria *speckle*, é um método baseado na correlação dos padrões de *speckle* dos interferogramas. Na figura 2.11 está representada uma montagem experimental típica de sherografia.

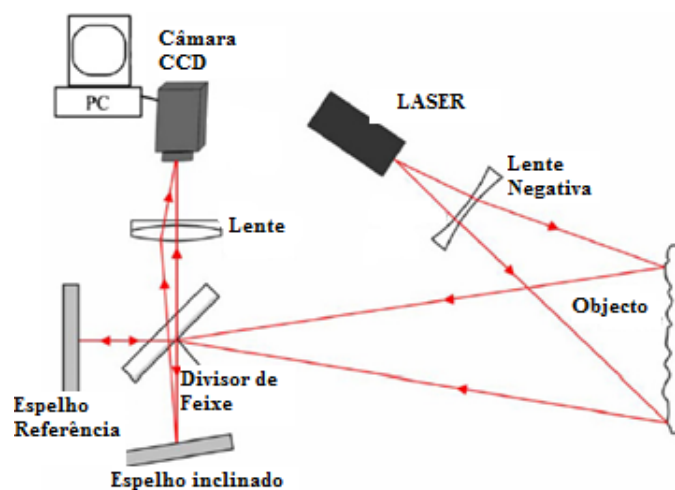


Figura 2.11 – Representação esquemática duma montagem de Shearografia [15].

A shearografia é um método usado para medição de variações de campos de deformação. O sistema é geralmente uma montagem que é sensível a gradiente de deslocamento fora do plano, embora possa, também, ser utilizado para a medição de deformações no plano.

O objecto é iluminado por um feixe de luz laser, a luz reflectida passa através de uma lente e é dividida em dois feixes iguais, interferómetro de Michelson, como se pode ver na representação da figura 2.12.

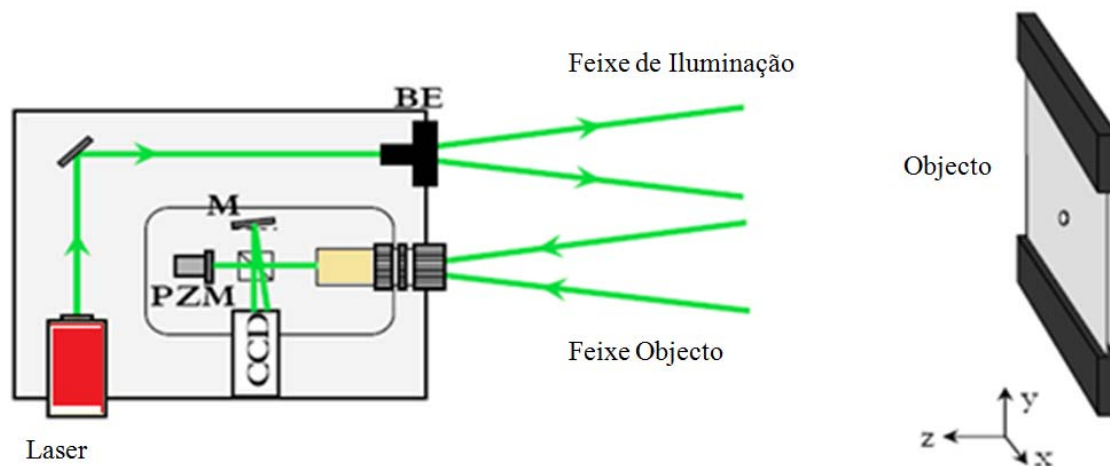


Figura 2.12 – Representação de Shearografia; M-espelho, BE- feixe expandido, PZM espelho piezoelétrico [10].

Um dos feixes é reflectido pelo espelho com o piezoelétrico e incide no detector CCD. O outro feixe é reflectido por um espelho inclinado e interfere com o outro feixe no detector CCD. O espelho inclinado vai dar origem a dois pontos vizinhos na superfície do objecto de forma a interferir num único ponto do detector. A diferença de fase interferométrica detectada deve-se à diferença dos caminhos ópticos entre esses dois pontos. Que é descrita pela equação:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\sin\theta \frac{\partial u}{\partial x} + (1 + \cos\theta) \frac{\partial w}{\partial x} \right] \Delta x_0 \quad \text{Equação 2.42}$$

Onde, θ é o ângulo entre a direcção do feixe de iluminação e de observação, u e w são as deformações nas direcções x e z respectivamente e Δx_0 é a *Shear* introduzido. Isso significa que o que é analisado é a variação da deformação superficial, por outras palavras, a derivada do campo de deslocamentos. É o facto de se medirem as derivadas espaciais que torna esta técnica muito útil para a detecção de variações de deslocamentos localizados, como o exemplo da propagação de uma fissura. Dependendo da variação da inclinação do ângulo do espelho e da sua direcção pode-se controlar a amplitude e direcção da variação do campo de deslocamentos.

O mapa de franjas alcançado com este método é ligeiramente mais difícil de analisar uma vez que se faz um estudo da derivada em vez do estudo do campo de deslocamentos. Então são obtidos dois padrões de franjas em vez de apenas um, como é o caso da montagem ESPI, como se pode observar na figura 2.13.

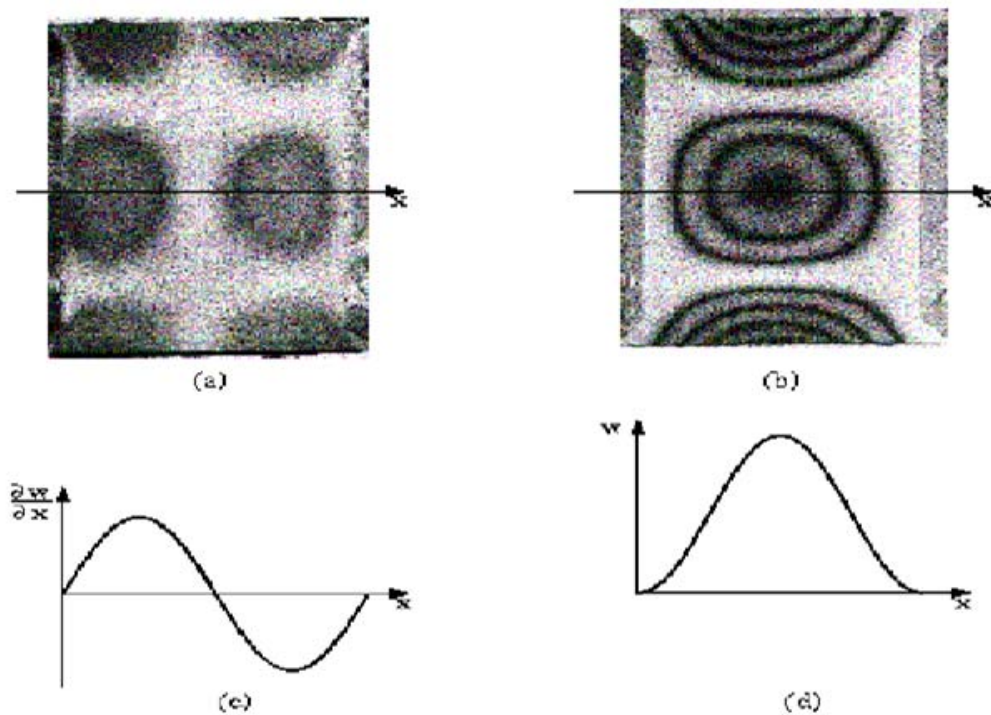


Figura 2.13 – a) Interferograma de shearografia b) Interferometria *speckle* fora do plano, c) Gradiente de vibração d) Amplitude de vibração imprimida [9].

As vantagens do método de shearografia são: elevada sensibilidade a variações localizadas no campo de deslocamentos, pouco sensível ao ruído. Apresenta como principais desvantagens a dificuldade na interpretação dos interferogramas e a dificuldade na calibração do sistema para a obtenção de resultados quantitativos.

Na figura 2.14 pode observar-se um esquema do processo completo de shearografia.

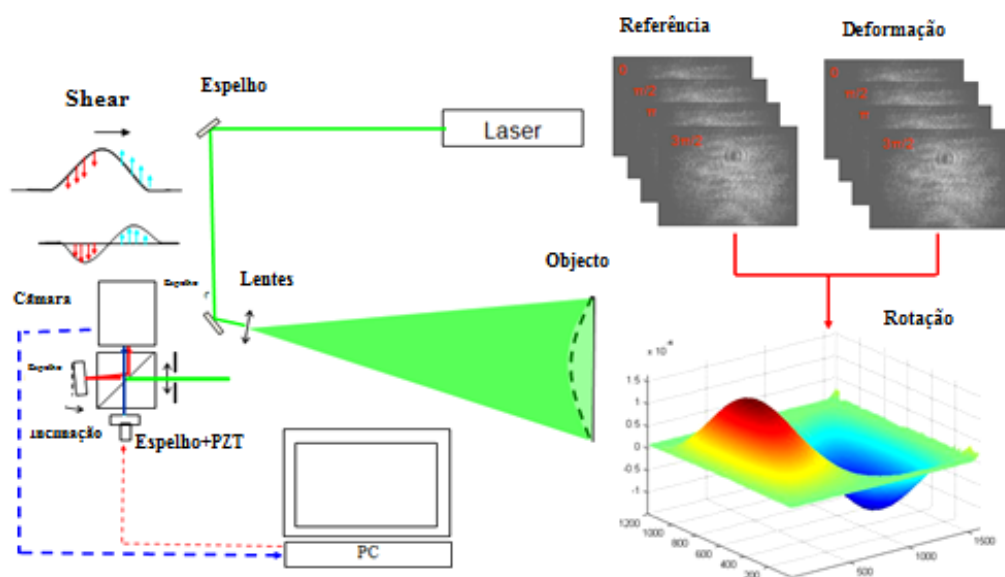


Figura 2.14 – Representação completa da técnica de shearografia [7].

2.1.2.2.5- Comparação Shearografia Versus ESPI

A *Shearography* utiliza um padrão de *speckle* como referência dando origem a uma diminuição do contraste dos padrões de interferência. Contudo, o facto de este interferómetro possuir dois braços com o mesmo percurso introduz algumas características desejáveis na sua utilização:

- A montagem óptica é bastante simples e pouco sensível a instabilidades;
- Como ambos os braços do interferómetro têm o mesmo percurso, esta montagem é menos sensível a perturbações introduzidas no caminho dos feixes;
- Pode ser utilizada com lasers de reduzido comprimento de coerência;
- Permite obter directamente as derivadas dos deslocamentos, característica que se revela bastante útil na medição de gradientes localizados [7].

Na técnica de ESPI trata-se também de uma técnica não destrutiva e as principais propriedades são:

- Medição em tempo real
- Elevada resolução (abaixo de 0.5 nm)
- Medições estáticas e dinâmicas de deslocamentos no plano e fora do plano
- Extensão de medição (10 mm)
- Laser com elevado comprimento de coerência
- Elevada sensibilidade a perturbações externas
- Ajuste da montagem óptica bastante complexa.

Na figura 2.15 podemos observar uma esquematização de todo o processo de ESPI

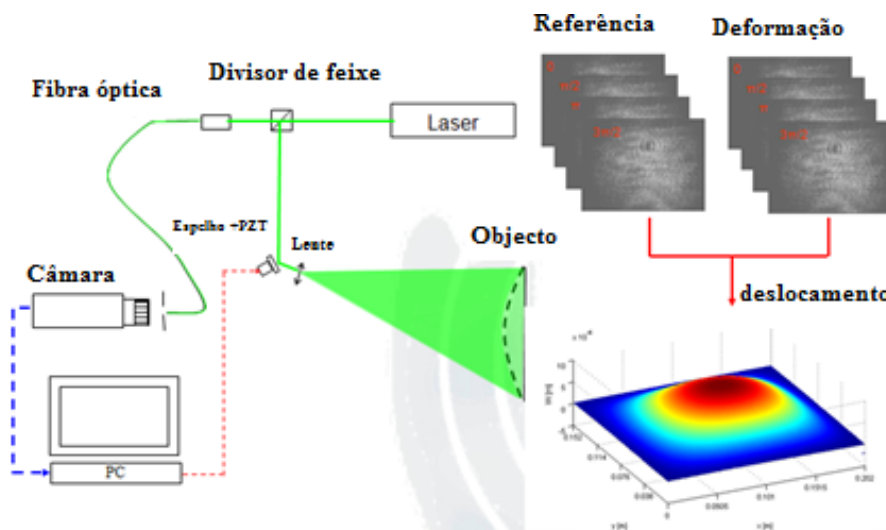


Figura 2.15 – Sistema ESPI [7].

Na montagem óptica de shearografia, qualquer deslocamento do objecto que altere simultaneamente ambos os feixes não provoca o aparecimento de franjas, embora possa reduzir o contraste do padrão de interferência por descorrelação do *speckle*. As franjas de interferência resultam da existência de gradientes de

deslocamento ou gradientes na amplitude de vibração. A detecção destes gradientes permite determinar o posicionamento dos defeitos e ter uma estimativa da sua extensão. Embora a resolução da medida seja equivalente à dos sistemas ESPI convencionais, é possível alterar a sua sensibilidade fazendo variar a direcção e grandeza do deslocamento (*Shear*) introduzindo entre as imagens. Na figura 2.16 está representada a montagem óptica utilizada para esta aplicação, e as diferenças entre os padrões de interferência obtidos para uma deformação da superfície que conduza ao aparecimento de uma convexidade, figura 2.17.

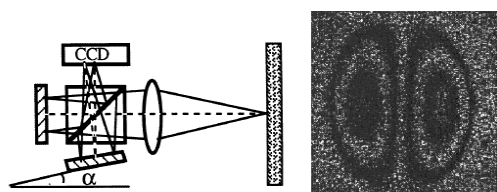


Figura 2.16 – Sistema Shear.

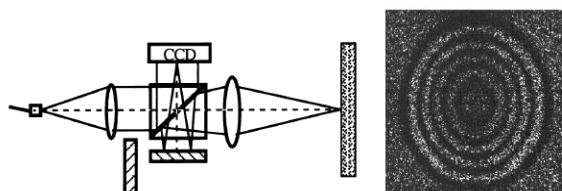


Figura 2.17 – Sistema ESPI.

Na figura 2.18 apresentam-se uma montagem para shearografia e faz-se a comparação entre os padrões obtidos com a técnica de shearografia e os padrões obtidos da montagem convencional de ESPI.

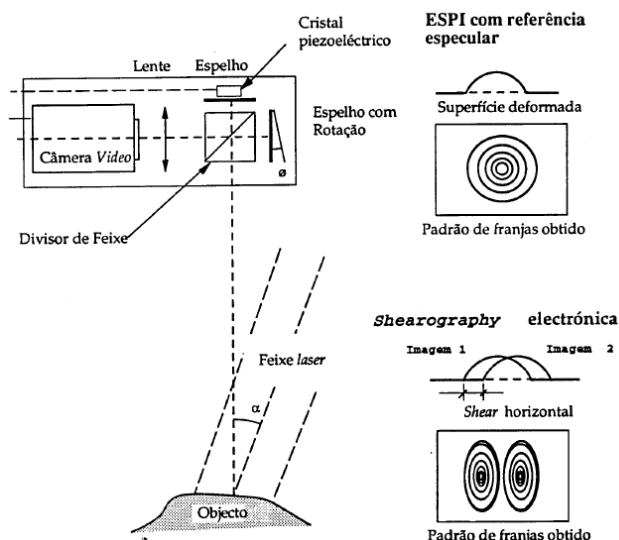


Figura 2.18 – Montagem óptica para shearography e comparação entre os padrões obtidos com esta técnica e os obtidos com uma montagem convencional de ESPI [8].

2.1.3- Descorrelação

Na interferometria holográfica a alteração do padrão criado a partir da interferência de diferentes frentes de onda coerentes é usado método de medição. Da interferência resultam padrões de *speckle* que contêm a informação de fase. A fase de cada *speckle*, apesar de independente, pode ser relacionada entre grãos vizinhos para distâncias inferiores ao comprimento de coerência da luz. A característica aleatória da intensidade e fase

observadas num padrão de *speckle* podem ser descritas por funções estatísticas. Esta propriedade dá origem à interferência de *speckle* correlativo e decorrelativo. A interferência do *speckle* não correlativo introduz uma componente aleatória na fase que se manifesta pela destruição do contraste das franjas no plano de observação. Também a rotação em torno do eixo do plano e ou a translação no plano de observação resultam na decorrelação do *speckle* gradual até a um limite da decorrelação total. Acrescentando a este, há a sobreposição do campo de *speckle* não correlativo ao *speckle* correlativo, efeito observado nas técnicas de salto de fase (*phase shifting*). A perda de contraste nas franjas é uma consequência da decorrelação gradual do *speckle*. Na metrologia por interferometria de *speckle*, o espaçamento entre franjas é, normalmente, muito superior à dimensão do *speckle* [10].

Um sistema de formação de imagem e uma matriz de sensores CCD são normalmente usados para registar digitalmente a intensidade correspondente à fase de *speckle*. A abertura do sistema óptico deve ser ajustada para que o tamanho do *speckle* coincida com a dimensão de cada sensor $\Delta \xi$ e assim garantir que o *speckle* é totalmente resolvido. A decorrelação parcial por translação no plano de imagem do *speckle* observa-se entre duas medições quando ocorre um movimento de translação e ou de rotação do objecto. Este efeito é agravado pelo factor de ampliação do sistema óptico de observação, restringindo o objecto a pequenos movimentos. A translação do *speckle* no plano de imagem Δx pode ser estabelecida a partir das características do sistema óptico de observação:

$$\Delta x = \frac{1}{m} \frac{f}{D_1} \lambda \quad \text{Equação 2.37}$$

em que m é o factor de ampliação, D_1 é o diâmetro da abertura, f é a distância focal e λ o comprimento de onda da luz. Para factores de ampliação grandes do sistema óptico, a sensibilidade à decorrelação da translação no plano do objecto é maior.

Na interferência de duas frentes de onda, a decorrelação numa estrutura sob solicitações pode surgir numa ou nas duas frentes, dependendo da sua origem. A decorrelação de duas frentes de onda criadas a partir da reflexão no objecto, interferência com sensibilidade no plano (ESPI no plano) e o gradiente com sensibilidade fora do plano (*Shear*).

2.2- Cálculo de Fase

A grandeza fundamental na interferometria óptica é a fase das franjas que contém a informação sobre o deslocamento ou deformação do objecto. Durante as duas últimas décadas, acompanhando o desenvolvimento dos sistemas de processamento de imagem, várias técnicas de avaliação automática da fase dos padrões de franjas foram desenvolvidas:

- Técnicas de discretização ou *fringe tracking*
- Técnicas temporais ou de *phase-stepping*

- Técnicas espaciais ou baseadas no cálculo de *Fast Fourier Transform*.

Todas estas técnicas apresentam vantagens e inconvenientes, por isso, os critérios de decisão dependem das condições particulares de cada aplicação.

Apesar do método de discretização ser extremamente moroso e estar sujeito a problemas de solução não trivial é por vezes a única alternativa à avaliação das franjas. A sua vantagem advém do facto de funcionar relativamente bem em casos de padrões de franjas de bom contraste e de não necessitar de dispositivos de modulação de fase ou de manipulação das frentes de onda.

As técnicas mais aceites envolvem no entanto o cálculo da fase em cada ponto (*pixel*) do padrão de interferência. Alterações introduzidas num dos braços do interferómetro permitem realizar estes cálculos. Num dos casos recorre-se à translação das franjas introduzindo variações de fase conhecidas, no outro, uma rotação numa das frentes de onda gera uma frequência portadora espacial que é modulada pelo sinal que se deseja calcular. Neste último caso o cálculo por Transformada de Fourier permite isolar o termo com sinal e obter a sua distribuição de fase.

Considerando as duas últimas técnicas de cálculo de fase é possível reescrever a equação da intensidade em cada ponto em função da intensidade do padrão de interferência em cada ponto de uma forma mais generalizada:

$$I_{(x,y)} = I_{0(x,y)}(1 - M_{(x,y)} \cos(\Phi_{(x,y)} + 2\pi f_0 r + \alpha_i)) \quad \text{Equação 2.38}$$

Em que $I_{0(x,y)}$ é a intensidade do sinal em cada ponto, $M_{(x,y)}$ é a modulação das franjas f_0 é a frequência portadora da informação introduzida através da criação de franjas paralelas.

Nesta expressão o argumento da função cosseno contém informação que permite obter as várias incógnitas recorrendo a algoritmos baseados nas técnicas anteriormente referidas. Enquanto o primeiro termo diz respeito a fase do sinal de interesse o segundo descreve uma portadora espacial e o último diz respeito a uma fase constante introduzida por alteração do comprimento de um dos braços do interferómetro.

2.2.1- Técnicas de modulação temporal de fase

Estas técnicas apresentam como principal vantagem o facto de o cálculo de fase ser realizado ponto a ponto sem qualquer propagação espacial de erros. Em medições estáticas ou quase –estáticas, a fase de interferência é determinada recorrendo às técnicas de modulação temporal de fase, designadas de salto de fase (*phase shifting*). Estas técnicas usam o princípio da correlação entre a intensidade e a variação discreta da fase imposta entre o feixe objecto e o feixe de referência em cada registo. O padrão de interferência devido ao fenómeno em análise deverá permanecer constante durante a gravação das imagens o que implica uma grande estabilidade de toda a envolvente da medida. Sendo assim esta técnica é mais adaptada para a medição de

fenómenos quasi-estáticos. As equações que expressam a distribuição da intensidade gravada $I_n(x,y)$ em função do salto de fase, para um estado inicial A e final B da deformação, são assim definidas:

$$I_{A,n}(x,y) = I_A^{OBJ}(x,y) + I^{REF}(x,y) + 2\sqrt{I_A^{OBJ}(x,y)I^{REF}(x,y)} \cos[\psi_A(x,y) + \Phi R_n] \quad \text{Equação 2.39}$$

$$I_{B,n}(x,y) = I_B^{OBJ}(x,y) + I^{REF}(x,y) + 2\sqrt{I_B^{OBJ}(x,y)I^{REF}(x,y)} \cos[\psi_B(x,y) + \Delta\Phi(x,y) + \Phi R_n] \quad \text{Equação 2.40}$$

Onde $\Delta\Phi(x,y)$ é a fase da interferência e ΦR_n é a evolução discreta da fase. O salto de fase pode ser criado no feixe de referência ou no feixe objecto por translação, em fracções do comprimento de onda da luz, de um espelho acoplado a um actuador piezoeléctrico [10].

Sob o ponto de vista teórico, qualquer valor arbitrário de salto de fase e número de imagens superiores a 2 pode ser usado na determinação da fase do interferograma. Dos métodos usados na determinação da fase por *phase stepping* o mais comum é o de 4 imagens com degraus de fase de $\pi/2$. A expressão de cálculo é da forma:

$$\Delta\phi = \tan^{-1} \left(\frac{I_{270} - I_{90}}{I_0 - I_{180}} \right) \quad \text{Equação 2.41}$$

Na figura 2.19 podemos observar um exemplo de um mapa de fase obtido a partir de 4 padrões de *speckle* secundários.

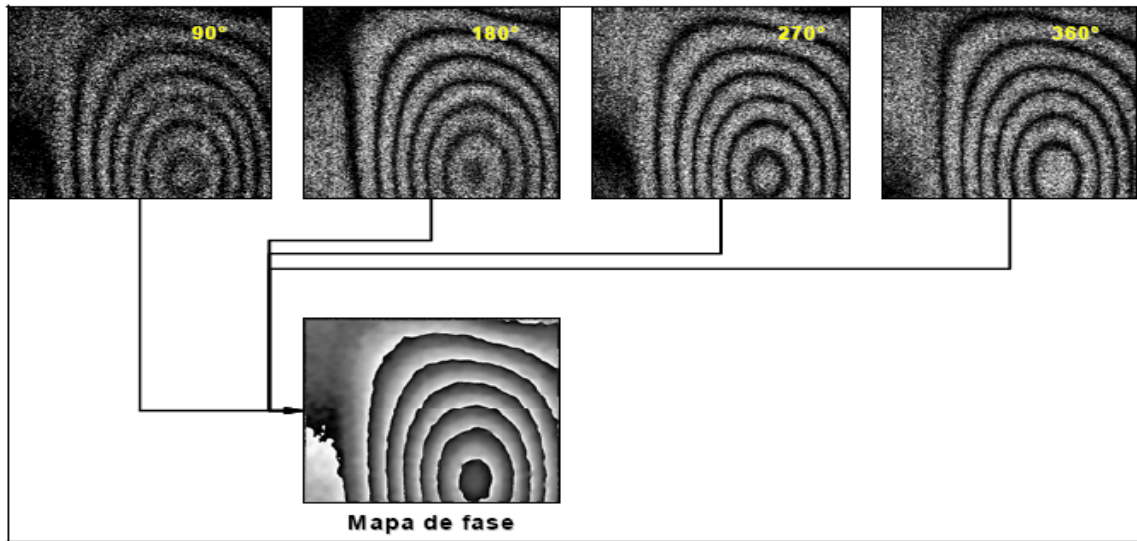


Figura 2.19 – Obtenção de um mapa de fase a partir de 4 padrões de *speckle* secundários [3].

É possível usar outras expressões com diferentes degraus de fase. O algoritmo apresenta menor sensibilidade aos erros introduzidos na imposição da fase conhecida. No sentido de diminuir a influência da instabilidade da montagem a aquisição das imagens deve ser realizada o mais rápido possível.

2.3- Técnicas de processamento de imagem

O objectivo dum sistema de processamento de imagem é melhorar, analisar, segmentar ou mesmo reconhecer uma ou varias imagens usando um computador. Nos anos mais recentes, o aumento de capacidade de cálculo e armazenamento dos computadores permitiu a aplicação a diversos campos da ciência do processamento digital de imagem [19].

As técnicas de processamento digital de imagem estão divididas nos domínios de aplicação, qualitativo e quantitativo. A componente quantitativa trata da metrologia das grandezas físicas, através da caracterização da intensidade de luz associada à medição. Para as técnicas ópticas de interferometria *Speckle* tem particular interesse a análise metrológica de quantidades físicas, recorrendo a técnicas específicas de processamento de imagem [20].

Existem sistemas integrados de processamento de imagem e placas de processamento de imagem que podem ser introduzidas num vulgar computador pessoal, sendo por isso soluções muito mais acessíveis e actualmente suficientemente potentes para aplicações usuais de processamento. Os componentes principais do sistema de processamento de imagem criado para este trabalho de dissertação estão representados na figura 2.20.

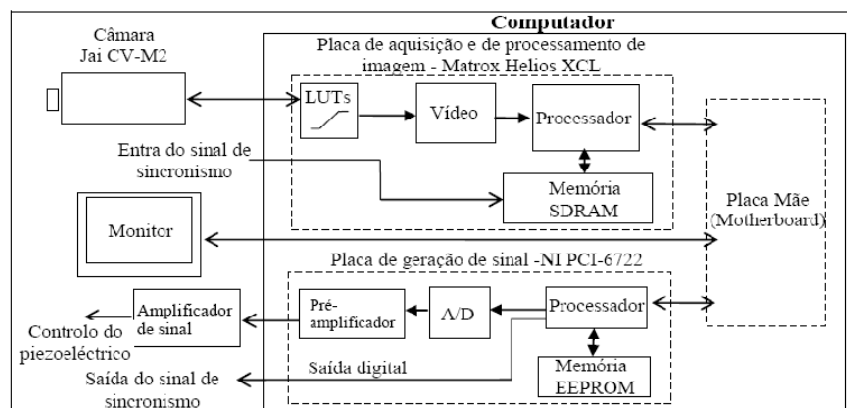


Figura 2.20 - Componentes do sistema de aquisição e de processamento digital das imagens interferométricas [21].

A imagem é adquirida através de uma câmara, normalmente uma câmara CCD ou câmara vidicon. O sinal analógico produzido pela câmara é transformado em digital através de uma operação chamada digitalização. A digitalização é feita por amostragem do sinal analógico em intervalos de tempo discretos, convertendo essa amostra (*pixel, the picture element*) num valor digital. A imagem na forma digital é então armazenada em memória RAM, existente na placa de processamento de imagem ou no próprio computador. Esta memória armazena um pixel em cada uma das suas unidades de memória e pode ser acedida pelo computador do sistema. A imagem armazenada em memória pode ser visualizada num monitor externo. Um conversor digital/análogo transforma o valor do pixel armazenado em memória de novo em sinal analógico de modo a ser possível ver a imagem num monitor externo. O processamento pode se feito na placa de processamento de imagem ou no próprio computador. Entre os conversores A/D e D/A e a memória de imagem existem as tabelas de entrada e saída (LUT) que permitem modificar os valores que são digitalizados ou os que são exibidos no

monitor de vídeo externo. A tabela de entrada pode ser realimentada, o que permite executar operações fundamentais para a nossa área de investigação, como por exemplo a subtração em tempo real.

No modo de aquisição contínuo são transmitidas 17 imagens por segundo no formato de 1608x1208 píxeis e codificadas em 10 bits. No modo rápido (PIV mode), a aquisição é comandada a partir de um sinal de sincronismo externo por via da placa de imagem, sendo efectuados dois registos rápidos com o intervalo mínimo de 1,5 μ s. O processamento das imagens pode ser feito na própria placa de aquisição ou no computador. Como, neste caso, o modelo da placa de imagem não é suportada pelo software MATLAB 7.5®, o processamento das imagens é realizado com suporte no microprocessador do computador. A técnica de modulação temporal de fase é introduzida pela translação do espelho através da aplicação de um nível de tensão ao transdutor piezoeléctrico de suporte, gerado através da placa de sinal NI® PCI-6722. O movimento do espelho é definido em função de uma calibração preliminar e sincronizado com a frequência de gravação de imagem de modo a permitir o registo rápido dos mapas de interferência, contribuindo desse modo para a estabilidade da medição.

2.3.1- A tecnologia de aquisição de imagem

A câmara de vídeo é um dos componentes fundamentais num sistema de processamento de imagem. Nos sistemas de registo digital, a imagem é discretizada num conjunto de pontos formados a partir de sensores dispostos matricialmente num transdutor electro-óptico CCD ou CMOS. A tecnologia CCD é desenvolvida a partir da alteração das propriedades eléctricas de uma placa semicondutora de silício, formando um conjunto de condensadores de metal óxido de silício (MOS). Trata-se de um substrato de silício intrínseco (do tipo P - dopado positivamente) com uma camada isoladora de dióxido de silício (SiO₂) colocado numa das faces, figura 2.21. Uma fina camada de metal, designada de eléctrodo (porta), é depositada sobre a camada isoladora. Pela aplicação de uma diferença de potencial positiva entre a porta e o substrato, obtém-se o afastamento das lacunas (cargas positivas) da camada isoladora e a consequente migração das cargas minoritárias (cargas negativas - electrões) para junto da camada de dióxido de silício. Na condição de incidência de luz, a energia dos fotões é transferida para o substrato, produzindo-se pares de lacunas/electrões livres. Na presença de uma diferença de potencial eléctrico, os electrões livres migram para a região sob o dióxido de silício, realizando-se um correspondente aumento do número de lacunas junto ao pólo negativo. O fenómeno aumenta com o nível de energia de luz absorvida, sendo a carga eléctrica maior sob a camada isoladora. O processo termina quando é atingida a saturação ou retirada a diferença de potencial [21].

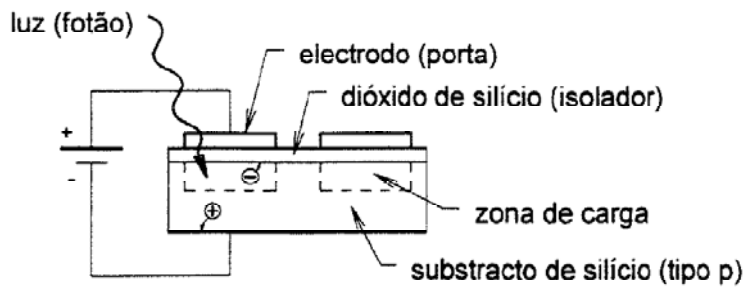


Figura 2.21 – Tecnologia CCD de registo de imagem [19].

2.3.1.1 – Opções de transferência de cargas

A transferência de cargas eletricas da matriz de sensores CCD pode ser realizada por 3 métodos diferentes: método de transferência de linha, método de transferência interlinha e método de transferência de quadro [6]. Na figura 2.22 podemos observar os três tipos básicos de transferência de carga num CCD.

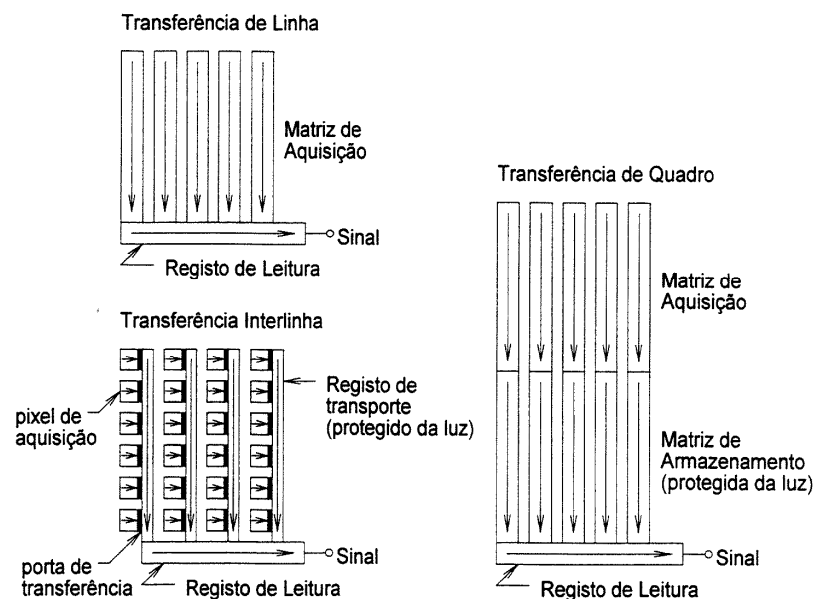


Figura 2.22 – Os três tipos básicos de transferência de carga num CCD [4].

No método de transferência de linha, os registos estão ligados em série e a transferência das cargas efectua-se linha após linha. O tempo de atraso entre a leitura e o registo das linhas dá origem ao fenómeno de arrastamento na imagem. A solução mais eficaz de evitar o efeito de arrasto é usar o método da transferência interlinha. Neste caso, as cargas são previamente transferidas para um registo vertical protegido da luz antes de serem lidas, podendo, de imediato, adquirir uma nova imagem. Contudo, a presença de registos paralelos para transferência das cargas limita o espaço da matriz de sensores activos.

A transferência de quadro é usado em aplicações onde se pretenda registar duas imagens num curto intervalo de tempo. Após aquisição da primeira imagem as cargas são rapidamente transferidas para uma matriz adjacente com a mesma dimensão da matriz de sensores activos. Em seguida inicia-se o registo da segunda imagem com a mesma duração de leitura da primeira [5].

No caso concreto da câmara utilizada neste trabalho de dissertação, no modo de aquisição contínuo é usado o método transferência de interlinha, sendo o período de leitura da linha de $47,9 \mu\text{s}$. Em relação ao modo de dupla exposição, método de transferência de quadro, o tempo de exposição da primeira imagem é de $4,68 \mu\text{s}$ e o tempo de transferência da imagem, correspondente ao atraso para o início da aquisição da segunda imagem, é pouco superior a $1,5 \mu\text{s}$.

2.3.1.2- Técnicas de filtragem dos mapas de fase

Os mapas de fase obtidos a partir das técnicas de interferometria *Speckle*, através das técnicas de modelação temporal de fase, com saltos fixos de fase, e técnica de modelação espacial de fase, pela transformada de Fourier de um único padrão contendo franjas portadoras, estão normalmente contaminados por ruído de medição de alta frequência. A decorrelação parcial ou total do *Speckle* é a principal fonte deste ruído, sendo o ruído electrónico nos sensores CCD e CMOS que se manifesta na forma de flutuações aleatórias na tensão ou na corrente o segundo mais importante. O ruído térmico, ruído de transição e a geração-recombinação de ruído, enquadram-se numa categoria de fontes de ruído menos influentes, sendo mesmo o ruído gerado pelo choque dos fótons nos sensores ópticos o menos importante [5].

As técnicas de filtragem de fase constituem a primeira e principal barreira na redução do ruído indesejável dos mapas. A aplicação destas técnicas tem como principal objectivo melhorar a relação sinal/ruído sem, no entanto, destruir a informação de fase, fundamental para a correcta determinação do campo contínuo da medição. Existem várias técnicas de filtragem sendo que aqui apenas explicar a *Windowed Fourier Transform*, que foi a utilizada neste trabalho. A influência do ruído é minimizada pela utilização de filtros do tipo passa-baixo, aplicados no domínio do número de onda, sendo concretizado através da construção de uma janela centrada no termo de ordem zero. A selecção da frequência de corte, dimensão da janela, é determinante para a sua eficácia na remoção dos termos importante do ruído e em particular o de mais alta frequência. Quanto às técnicas, *Windowed Fourier Transform* e *Short Time Fourier Transform*, o espectro é calculado em pequenas áreas recorrendo à transformada de Fourier. As duas principais vantagens deste procedimento estão na eliminação local das componentes sem afectar as regiões vizinhas e na simplicidade da análise destas componentes locais em relação ao espectro global. As componentes do número de onda, obtidas a partir da transformada de Fourier, são processadas definindo um limiar mínimo para a sua amplitude e atribuindo o valor zero para as restantes componentes. Com esta metodologia pretende-se eliminar as componentes do ruído que sendo de baixa amplitude se distribuem uniformemente ao longo do espectro. O filtro *Windowed Fourier Transform* difere do *Transform* e *Short Time Fourier Transform* na medida em que, no primeiro, a janela do filtro é centrada em todos os pontos do mapa de fase, enquanto no segundo, a janela é definida dividindo o mapa por regiões. A

representação do mapa de fase no domínio do número de onda é realizada através da sua transformada de Fourier discreta bidimensional:

$$\Delta\phi^{\sim}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=1}^{M-1} \Delta\phi^{\sim}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) e^{j2\pi(\frac{ux}{N} + \frac{vy}{M})} \quad \text{Equação 2.43}$$

onde \mathbf{u} e \mathbf{v} representam, respectivamente, o número de onda na direcção x e y para um mapa de fase de dimensão $N \times M$. As componentes mais significativas da fase são isoladas através da aplicação, no domínio do número de onda, de um filtro ao espectro da fase, sendo o correspondente mapa de fase no domínio espacial obtido através da sua transformada de Fourier inversa:

$$\Delta\phi^{\sim'}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=1}^{M-1} \bar{h}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \times \Delta\phi^{\sim}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) e^{j2\pi(\frac{ux}{N} + \frac{vy}{M})} \quad \text{Equação 2.44}$$

onde $\bar{h}(\mathbf{u}, \mathbf{v})$ é a função que define a dimensão da janela de filtragem. Na primeira técnica de filtragem, esta função adquire o valor de 1 para frequências inferiores à frequência de corte e zero para as restantes. A segunda e terceira técnica, para o conjunto de frequências seleccionadas cuja amplitude seja superior ao valor definido como limiar é atribuído o valor 1 ao filtro, os restantes termos tomam o valor zero. Por fim, o mapa de fase definido no domínio espacial é determinado substituindo na expressão 4.2 o mapa de fase no domínio complexo após filtragem. A análise por transformada de Fourier constitui um retrocesso na representação de sinais, na medida em que há uma perda da informação espacial com a passagem para o domínio do número de onda. Todavia, as técnicas *Windowed Fourier Transform* e *Transform* e *Short Time Fourier Transform* apresentam um compromisso entre a informação no domínio espacial e a informação no domínio do número de onda. O espectro é obtido para um determinado tamanho da janela, sendo a mesma para todas as frequências. No entanto, alguns sinais requerem uma abordagem mais flexível, onde a janela deve variar de tamanho para representar de modo mais verdadeiro a distribuição espacial e a frequência do sinal. A análise por transformadas de Ondulas (*Wavelets*) constitui a abordagem mais indicada nestas situações. Nesta transformada, as janelas variam de tamanho e de região, permitindo dispor simultaneamente de maior precisão nas baixas e nas altas frequências quando são usadas janelas de grande e pequena dimensão, respectivamente.

A filtragem permite reduzir consideravelmente o ruído nos mapas de fase, tornando o processo de eliminação das descontinuidades *unwrapping* da fase mais simples. Porém na presença de elevado nível de ruído nos mapas, estes algoritmos não permitem remover completamente este ruído. Nestas situações, as perturbações nos mapas terão ser resolvidas por métodos de *unwrapping* robustos. Na continuação do pós-processamento dos mapas de fase e depois de analisadas as técnicas de filtragem de fase, segue-se o estudo do comportamento dos métodos de *unwrapping* da fase [5].

2.3.1.3 – Método de unwrapping da fase

Os mapas de fase apresentam distribuições descontínuas da fase, definidas pela modelação espacial da amplitude do campo de medição. Para a reconstrução do campo contínuo, correspondente ao campo de medida, é necessário remover correctamente estas descontinuidades através da aplicação dos métodos de *unwrapping*. Apesar das melhorias dos mapas de fase introduzidas pelo pré-processamento, continuam a persistir ambiguidades na fase decorrentes da persistência de ruído. A elevada densidade e/ou baixo contraste das franjas tornam o objectivo da remoção correcta das descontinuidades difícil de ser alcançado.

Os métodos de *unwrapping* estão divididos em duas categorias, a saber: métodos selectivos do caminho (*path-following methods*) e métodos da minimização da norma do erro (*mininum-norm methods*) [7]. Nesta tese apenas se faz referência dos métodos de unwrapping de minimização da norma do erro. Nos métodos selectivos do caminho, o campo contínuo de fase é determinado a partir da integração desta grandeza ao longo de um caminho definido por linhas de restrição. As linhas de restrição funcionam como barreiras à presença de inconsistências no mapa fase, tornando a solução única e independente do trajecto de integração. Por seu lado, os métodos de minimização da norma do erro apresentam uma abordagem completamente diferente. A solução é determinada a partir da minimização da função objectivo, designado por norma do erro, que é definida pela diferença entre as derivadas locais do campo contínuo de fase e as derivadas do mapa de fase medido. Considerando a solução do campo contínuo de fase $i, j \phi$ e da diferença de fase do mapa de fase medido $i, j \Delta$ pode definir-se a função norma do erro ε^P

$$\varepsilon^P = \sum_{i=0}^{M-2} \sum_j^{N-1} |\phi_{i+1,j} - \phi_{i,j} - \Delta_{i,j}^x|^P + \sum_{i=0}^{M-1} \sum_j^{N-2} |\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j} - \Delta_{i,j}^y|^P \quad \text{para } 0, 1, \dots, M \text{ e } j = 0, 1, \dots, N \quad \text{Equação 2.45}$$

onde o valor do expoente P depende do problema em análise, i, j são as coordenadas dos píxeis e $M \times N$ representam, respectivamente, a dimensão em número de píxeis na horizontal e vertical da imagem. A função objectiva pode ser formulada em termos dos parâmetros da distribuição pesada ou não da norma do erro [9]. A partir destes parâmetros e considerando os diversos valores do expoente da norma do erro são definidos a seguir no método FFT/DCT para a resolução do problema de minimização.

A resolução dos problemas de *unwrapping* por mínimos quadrados ($P=2$), adoptando a formulação não pesada da norma do erro, reduz-se à determinação da solução de um sistema de equações discretas de Poisson [27]. O método da transformada rápida de Fourier (FFT) ou transformada discreta dos co-senos (DCT) permite a resolução simples e eficiente das equações lineares deduzidas a partir destas equações. O método DCT é aqui tomado como uma extensão do método FFT para a resolução rápida de problemas de dimensão com imagens cujas dimensões são diferentes da potência de dois. A periodicidade das funções é garantida no método da FFT através de um processo adequado de simetrização do mapa de fase e no método DCT por imposição de condições de fronteira ao mapa sem extensão da informação, o que torna este segundo método mais eficiente [9]. O método determinístico de *unwrapping*, baseado na combinação da transformada directa e inversa de Fourier e com extensão da imagem pelo processo de simetrização, foi recentemente proposto por Volkov et al. [28]. O problema de minimização é resolvido no domínio do número de onda, recorrendo para o efeito, às propriedades da transformada de Fourier para a diferenciação e integração do mapa de fase $\Delta\phi(x,y)$. De acordo

as derivadas estabelecidas pela aplicação das condições de fronteira de Newmann às equações de Poisson, constata-se que a solução matemática do campo de fase contínuo, obtida por este método, é única. Esta condição está limitada pela banda de frequências da amostragem e pode ser determinado pela seguinte expressão [28]:

$$\Phi(x, y) = \Re \left\{ \frac{1}{2\pi j} FFT^{-1} \left[\frac{FFT(\partial x e^{j\Delta\phi(x,y)})q_x + FFT(\partial y e^{j\Delta\phi(x,y)})q_y}{q^2} \right] \right\} \quad \text{Equação 2.46}$$

$$\text{com } q^2 = q_x^2 + q_y^2 \neq 0$$

sendo a solução aproximada do gradiente do mapa de fase definido por:

$$\nabla e^{j\Delta\phi(x,y)} = \begin{pmatrix} \partial x e^{j\Delta\phi(x,y)} \\ \partial y e^{j\Delta\phi(x,y)} \end{pmatrix} = \Re \left[\frac{\nabla e^{j\Delta\phi(x,y)}}{j e^{j\Delta\phi(x,y)}} \right] - \nabla \Delta\phi(x, y) \quad \text{Equação 2.47}$$

onde FFT e FFT^{-1} representam, respectivamente, a transformada directa e inversa de Fourier, o símbolo \Re designa a componente real da função complexa, x e y correspondem à projecção horizontal e vertical do número de onda e $j = -1$. A partir do modelo teórico do comportamento do método determinístico observa-se que este é capaz de resolver a fase até ao limite de franjas de fase espaçadas de dois píxeis, e mostra-se independente do caminho de integração e rapidez de cálculo. A rapidez do cálculo é consequência da utilização da transformada rápida de Fourier [28].

2.3.1.4 - Técnicas de filtragem do campo de medida

O estudo das técnicas de filtragem aplicado aos campos de medida surge na sequência do pós-processamento dos mapas de fase para a determinação das derivadas espaciais até à terceira ordem do campo de deslocamentos. A eficácia da aplicação de filtros do tipo passa-baixo nas regiões limites do campo de medida é, em geral, perturbada pela presença de descontinuidades, as quais se traduzem por termos de elevada ordem no domínio do número de onda [22].

O comportamento das técnicas de filtragem é determinado pela combinação dos vários parâmetros que estão associados a cada filtro. Da análise comparativa destes valores permite verificar que globalmente há um agravamento do erro com o nível de ruído e que as técnicas Média, Gaussiano, *Spline* e FFT são considerados mais eficazes na remoção do ruído nos campos de medida, por apresentarem menores valores do erro. Na prática, são habitualmente usadas as técnicas de filtragem Média ou Gaussiano devido ao seu menor tempo de processamento e à facilidade no ajuste dos seus parâmetros [7]. Neste trabalho foi utilizada a técnica de filtragem Média.

2.4 - Referências

1. Newton, Isaac. *Optics: or treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light*. London : Ed. William & John Innys, 1721.
2. Young, T. *On the theory of light and colours*. s.l. : Philos. Trans. Roy. Soc. Lond., 1802.
3. Santos, Fernando. *Novos Métodos De Interferometria De Speckle Com Lasers De Impulso*. Porto : FEUP, 2003.
4. Carter, William H. *Applications of Speckle Phenomena* . s.l. : SPIE, 1980.
5. Monteiro, Jaime. *Desenvolvimento de um sistema interferometria Holográfica (ESPI) para análise de estruturas sob solicitações estáticas e dinâmicas*. Porto : FEUP, 1998.
6. Dainty, J.C. *Laser speckle and related phenomena*. s.l. : Springer - Verlag, 1984.
7. Lopes, Hernani. *Desenvolvimento de Técnicas Interferométricas, Contínuas e Pulsadas, Aplicadas à Análise do Dano em Estruturas Compósitas*. Porto : FEUP, 2007.
8. Vaz, Mario. *Interferometria laser e métodos híbridos em mecânica experimental*. Porto : FEUP, 1995.
9. Ranson, W. H. Peters and W. F. *Digital image techniques in experimental stress analysis*. s.l. : Optical Engineering, 1982.
10. Svanbro, Angelica. *Speckle Interferometry and Correlation Applied to Large-Displacement Field*. Lulea : University of Technology, 2004. ISSN:1402-1544.
11. Butters, Leendertz J.A. and. *An image-shearing speckle pattern interferometer for measuring bending moments*. s.l. : J. Phys. E.: Sci. Instrum., 1973.
12. Lopes, Hernâni. *Desenvolvimento de Técnicas Interferométricas, Contínuas e Pulsadas, Aplicadas à Análise do Dano em Estruturas Compósitas*. Tese de Doutoramento, Porto : FEUP, 2007
13. Powell, R.L., K.A., *Interferometric Vibration Analysis by Wavefront Reconstruction*. s.l. : Journal of the Opt. Soc. of America, 1965, Vol. 55.
14. Haines, K.A., Hildebrand, B.P. *Surface-Deformation Measurement Using the Wavefront reconstruction Technique*. s.l. : Applied Optics, 1966.
15. Bernardo, Luis Miguel. *Fundamentos do Processamento Óptico*. s.l. : FCUP, 1981.
16. Ono, Luis Katsuya. *Reprodução da Experiência : Interferômetro de Michelson*. s.l. : USP.
17. D. Francis, S.W. James and R P Tatam. *Surface strain measurement using multi-component shearography with coherent fibre-optic imaging bundles*. s.l. : IOP Publishing, 2007.

18. Krishnaswamy, Pavel A Fomitchov and Sridhar. *A compact dual-purpose camera for shearography and Electronic Speckle-pattern interferometry*. Evanston : Meas. Sci. Technol., 1997.
19. Kreis, T. *Handbook of holographic interferometry : optical and digital methods* . s.l. : Wiley-VCH, 2005.
20. Pritt, D.C. Ghiglia and M.D. *Two-dimensional phase unwrapping : theory, algorithms and software*. New York : Wiley, 1998.
21. Chousal, José A. G. *Técnicas de Processamento de imagem obtidas por métodos ópticos em análise experimental de tensões* , Tese de Doutorado. Porto : FEUP, 1999.
22. Lopes, H.M.R., R.M. Guedes, and M.A. Vaz. *An Improved Mixed Numerical-Experimental*. s.l. : Optics & Laser Technology, 2007.
23. Lage, Armindo L.V.Soaes. *Técnicas Ópticas na Análise de Fenômenos Dinâmicos*, Tese de Doutorado Porto : FEUP, 1987.
24. Y., Hung *Shearography: a new optical method of the strain measurement and non-destructive testing*.. s.l. : Optical engineering, 1982.
25. Roger M. Groves, Ralph P. Tatam. *Full-field Laser Shearography Instrumentation for the Detection and Characterisation of Fatigue Cracks in Titanium*. s.l. : ASTM Symposium on Full-Field Optical Deformation Measurement: Applications and User Experience, 2002.
26. Ribeiro, João. *Caracterização Experimental e Numérica de Campos de Tensões Residuais Provocadas por Processos de Fabrico*, Tese de Doutorado, Porto : FEUP, 2006.
27. Zienkiewicz, O. C. *The Finite Element Method in Engineering Science* . New York : McGraw-Hill, 1971.
28. A. K. Pandey, M. Biswas, and M.M. Samman *Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shapes*. s.l. : Journal of Sound and Vibration, 1991.
29. Reddy, J.N. *An introduction to the finite element method*. s.l. : McGraw-Hill, 1993.
30. Timoshenko, S. and S. Woinowsky-Krieger,. *Theory of plates and shells*. New York : McGraw-Hill, 1959.
31. Pereira, João Luís Esteves. *Comportamento Mecânico da Madeira*, Tese de Doutorado, Vila Real : UTAD, 2005.
32. J.Blom, B.M.T.H.Romeny, A.Bel, and J.J.Koenderink. *Spatial derivatives and the propagation of noise in gaussian scale space*. Visual Communication and image representation, 1993.
33. M-Owner-Petersen, “Decorrelation and fringe visibility: on the limiting behavior of various electronic specklepattern correlation interferometers”, *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 8, 1991.

Capítulo 3 - Desenvolvimento e fabrico do sistema *Shear*

O principal objectivo deste trabalho foi o desenvolvimento e fabrico de um equipamento metrológico compacto e portátil (sistema *Shear*), que permitisse a medição do campo de deformações e o de rotações, com elevada resolução. Assim, neste capítulo faz-se a descrição da fase de desenvolvimento do sistema *Shear*, onde se expõe e explica a função dos seus principais elementos. Na segunda parte, descreve-se todo o processo de fabrico do sistema, apresentando as principais etapas desenvolvidas para a sua maquinagem e montagem. Finalmente, procedeu-se à calibração do sistema desenvolvido.

3.1 - Representação do sistema

O sistema *Shear* apresentado neste trabalho foi desenvolvido a partir do modelo já construído no LOME no âmbito da tese de doutoramento de Lopes [3]. Assim, o protótipo realizado nesta dissertação correspondeu a uma evolução desse sistema, tornando-o mais compacto e eficiente. Na figura 3.1 está representado o sistema *Shear* desenvolvido e construído neste trabalho.

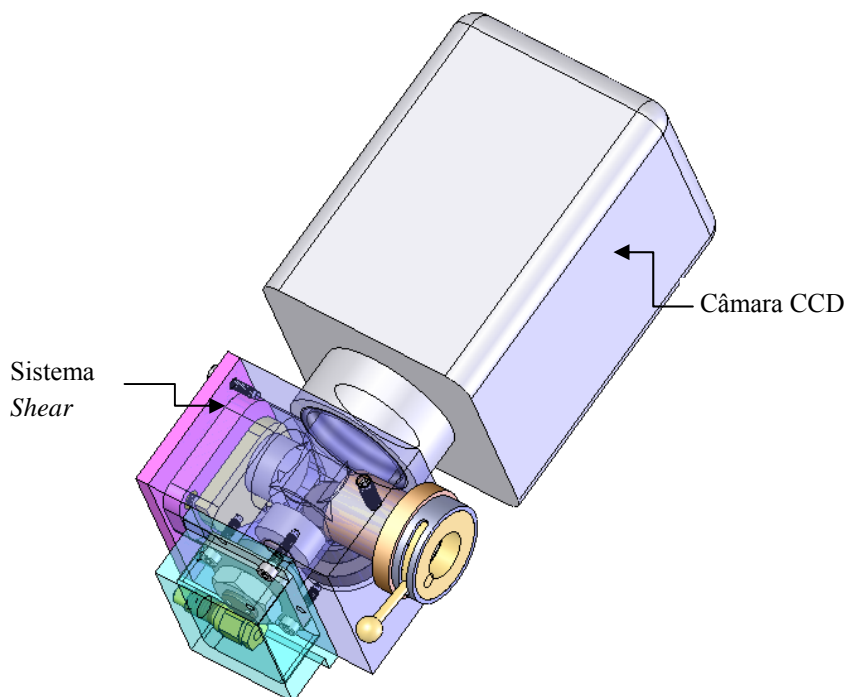


Figura 3.1 - Representação do sistema *Shear* com a câmara.

Na figura 3.1 encontra-se representado, esquematicamente, o sistema *Shear* e onde podem ser observados todos os seus componentes. Podendo-se salientar alguns, tais como, o piezo eléctrico, os espelhos, o divisor de feixe (*Beam splitter*), lentes e outros componentes ópticos, bem como a câmara. A peça que serve de guia para todas as outras é designada por corpo central, como se pode ver na figura 3.1, e está projectada de forma a garantir as distâncias focais e alinhamentos para um bom desempenho do sistema, assim como, todos os encaixes necessários para os outros elementos que o constituem.

No anexo A estão representados todos os elementos necessários para o funcionamento do sistema *Shear*, bem como o desenho de conjunto do referido sistema.

Depois de projectados todas as peças que suportam os componentes ópticos necessários ao sistema *Shear* procedeu-se à sua fabricação, estas foram maquinadas nos laboratórios de Fabricação Assistida por Computador e no de Oficinas de Mecânicas. O material utilizado nas peças fabricadas para este trabalho foi o alumínio comercial. Apesar das boas características mecânicas deste material, as ligas de alumínio têm uma elevada reflectividade luminosa, que é um efeito indesejável para este tipo de interferómetro óptico, necessitando de um tratamento posterior para eliminar a reflectividade.

3.2 - Componentes para o sistema *Shear*

Neste subcapítulo são abordadas as características mais importantes dos componentes utilizados nas montagens experimentais, justificando a sua escolha, tais como: lasers, transdutores piezoelétricos, câmaras CCD, lentes e espelhos para a construção de um sistema *Shear*. Os componentes foram projectados e posicionados sobre diversas peças que constituem o sistema *Shear*. O sistema tem por base o interferómetro de Michelson e todo o sistema foi desenvolvido para que o sistema fosse o mais compacto e eficiente possível. Na figura 3.2 está representado esquematicamente o interferómetro de Michelson.

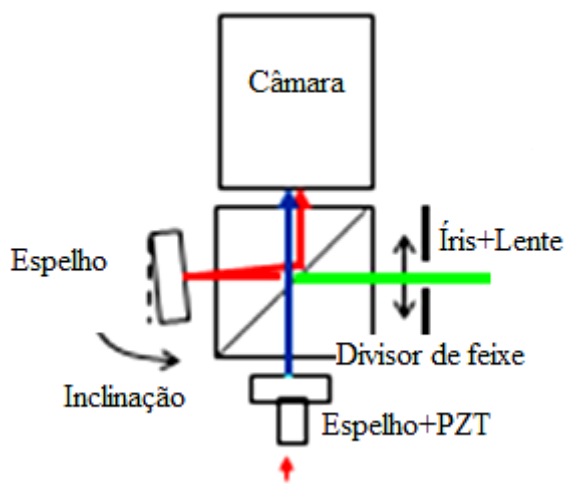


Figura 3.2 - Representação esquemática do Interferómetro de Michelson.

Analisando a figura 3.2, pode verificar-se que para a implementação deste interferómetro é necessário recorrer a vários elementos que possam ser ajustáveis e que estejam acopladas num único corpo central. Este, suportaria o divisor de feixe no seu interior, e teria várias aberturas onde iriam ser acoplados um conjunto de elementos ópticos: espelhos, lente e uma íris, bem como a câmara CCD. Como há a necessidade de proceder-se a alguns ajustamentos dos componentes ópticos para a correcta focagem imagem, controlo do tamanho de *speckle*, realizar o *phase shifting* e o *Shear*, desenvolveram-se elementos mecânicos que permitissem alguns graus de liberdade para a realização de determinados movimentos relativos. Assim, o elemento mecânico que suporta a íris e a lente deverá poder ter um movimento que permita a focagem e o ajuste da quantidade de luz vinda da frente de onda objecto e, desta forma, controlar o tamanho do *speckle*. Esta frente de onda, passando pela íris e lente vai ao divisor de feixe o qual divide-a em duas frentes: uma vai para o espelho que faz o *Shear* e a outra para o espelho que tem o piezoeléctrico e que desenvolve o *phase shifting*. As duas frentes reflectidas irão convergir na câmara CCD, onde ocorre a interferência.

3.2.1 - Corpo central

O corpo central é a peça que permite integrar todos os elementos necessários ao bom desempenho do sistema, como tal, o elemento mais complexo deste sistema e que exigiu um estudo mais exaustiva. Assim, no desenvolvimento deste elemento foi necessário, em primeiro lugar, estudar e determinar um conjunto de parâmetros ópticos importantes, tais como distâncias focais e de caminhos ópticos, alinhamentos dos feixes, etc. De seguida, analisou-se a localização e posicionamento dos diferentes componentes ópticos para criação do interferómetro Michelson. Finalmente, houve a necessidade de desenvolver soluções para o acoplamento mecânico de todos os componentes necessários para implementar o sistema *Shear*. Na figura 3.3, está representado o corpo central, que aqui é designada por peça 7, e estão esquematizadas as vistas que indicam o posicionamento dos diferentes elementos do sistema.

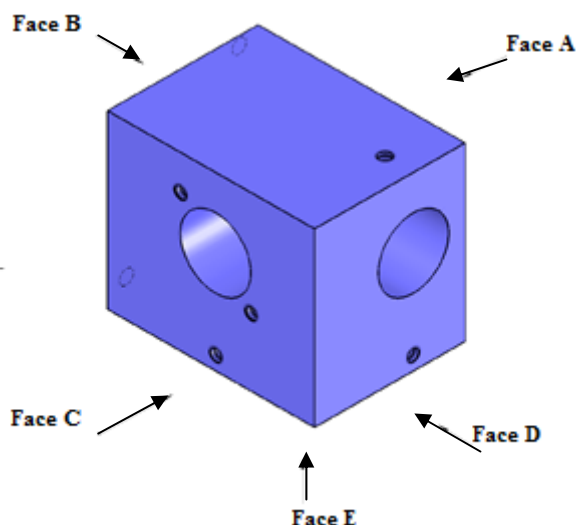


Figura 3.3 - Representação do bloco central (peça 7).

As faces indicadas na figura 3.3 representam a localização dos diferentes elementos utilizados no sistema *Shear* desenvolvido neste trabalho. Sucintamente, podem indicar-se as seguintes correspondências: na face A posiciona-se a Câmara CCD, na face B fica o espelho que permite fazer o *Shear*, na face C localiza-se o espelho colado ao piezoelétrico, na face D é montado um casquilho com a lente e a íris, a face E tem um furo roscado onde será colocado um suporte com o divisor de feixe, ficando este posicionado no centro de todo o sistema. As dimensões e os pormenores da peça 7 podem ser consultado no anexo A, onde se encontram os desenhos de definição do sistema desenvolvido e fabricado no âmbito deste trabalho. Nos pontos seguintes irá analisar-se pormenorizadamente, cada um dos elementos referidos neste parágrafo.

3.2.2 - Divisor de feixe

O divisor de feixe é o elemento óptico a partir do qual todo o sistema é projectado, é a peça central pois é a partir dela que se pode dimensionar os comprimentos dos respectivos caminhos ópticos. O divisor de feixe é um espelho cúbico que tem na hipotenusa um filtro que permite a transmissão de parte da luz e, assim, dividir um feixe de luz incidente em dois feixes diferentes e com a mesma intensidade, se for um divisor de feixe do tipo 50/50 (reflectividade/transmissibilidade) e que é o mais usual.

Para posicionar o divisor de feixe no centro do sistema *Shear* foi necessário criar um suporte que permitisse suporta-lo e, simultaneamente monta-lo no corpo central. Para isso, criou-se a peça, representada na figura 3.4, esta é constituída por dois elementos funcionais: uma face plana horizontal, onde é colado o divisor de feixe e uma região cilíndrica que tem a dupla função de fixar o conjunto ao corpo central e de ajustar o divisor de feixe. Na figura 3.4 está representada a peça que aqui é designada por peça 1 que é onde foi colado o divisor de feixe.

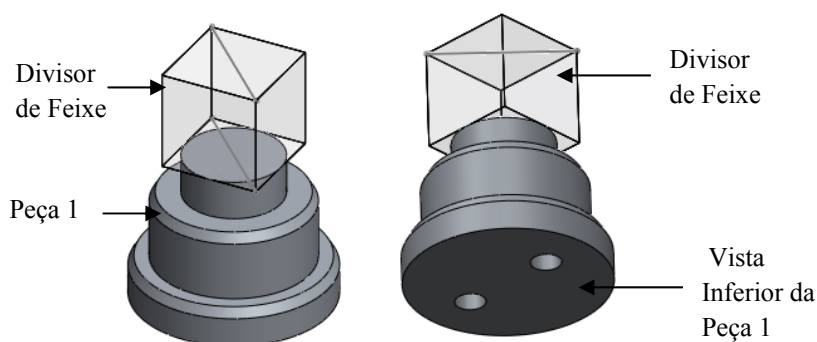


Figura 3.4 - Representação esquemática da peça 1 com o divisor de feixe.

O divisor de feixe é colado sobre a peça na parte onde o diâmetro é menor. O diâmetro é coincidente com a hipotenusa do divisor de feixe, que tem a forma de um cubo. A peça 1 tem uma geometria simples e circular de modo a permitir a rotação e ajuste do divisor de feixe, utilizando uma chave que engata nos dois furos inferiores e permite a rotação do conjunto. No anexo A está representada a peça 1 com todos os pormenores

construtivos. A precisão no posicionamento dos vários componentes e a funcionalidade dos mesmos são parâmetros considerados importantes no desenvolvimento deste sistema. O alinhamento do eixo óptico e o equilíbrio entre os caminhos ópticos do interferómetro são factores essenciais para obter uma boa qualidade nas medições [3]. Para se garantir a posição central do divisor de feixe foi criado um sistema de encaixe da peça 1 na peça 7, pelo diâmetro maior, como se pode verificar na figura 3.5.

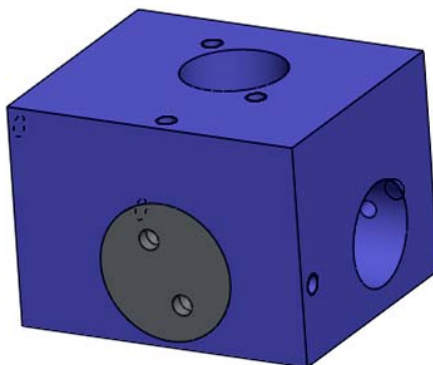


Figura 3.5 - Representação da peça 1 devidamente encaixada no corpo central.

A peça depois de se encontrar na posição correcta é aparafusado por um parafuso M3 que aperta lateralmente na peça 7 e vai pressionar na peça 1 para que depois de ajustado não se movimente da posição pretendida.

3.2.3 - Lente e Iris

A íris é a um elemento óptico que controla a entrada da luz para a lente e, no caso dos sistemas de interferometria, controla o tamanho do *speckle*. A lente é o elemento óptico que permite a focagem de um objecto. A frente de onda que vem do objecto passa um sistema íris-lente, antes de chegar ao divisor de feixe. Para posicionar e alinhar este sistema criou-se um suporte (casquilho) onde foram montados a íris e a lente. Numa das extremidades deste casquilho foi montada a íris enquanto na outra extremidade foi colocada a lente, tal como se pode ver na representação esquemática da figura 3.6 (c). A distância e o posicionamento dos dois componentes ópticos foram cuidadosamente estudados de modo a garantir as distâncias focais pretendidas. A excentricidade da peça é muito importante para garantir o paralelismo entre os componentes. Na figura 3.6 está representada a peça 5 com o encaixe da íris, figura 3.6 (A), o encaixe da lente 3.6.(B) e a vista em corte da peça 5 com os componentes nela posicionados.

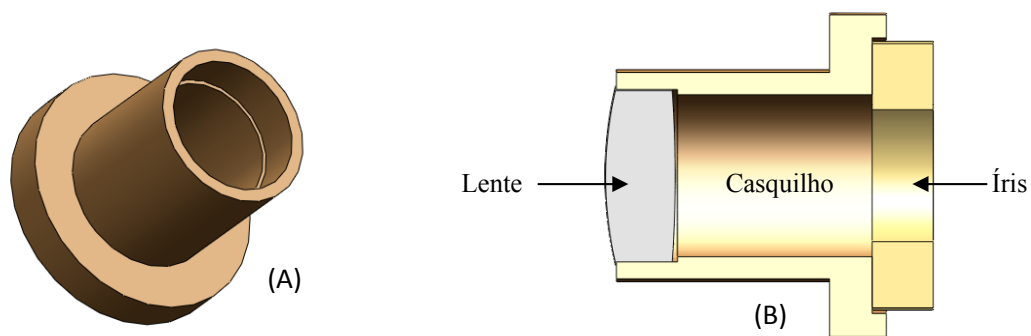


Figura 3.6 - Representação da peça 5 de encaixe da íris e da lente. (A) com o encaixe para a lente, (B) a vista em corte da peça 5 com os dois sistemas nela posicionados.

Fez-se um estudo para o toleranciamento entre o casquilho e corpo central, optando-se por um ligeiramente deslizante para permitir uma correcta focagem da superfície em análise. A focagem é executada pelo movimento axial do casquilho, desliza ao longo do furo do corpo central. Após a correcta focagem da imagem, o casquilho é fixado através dum parafuso que o prende contra a parede do furo que se encontra na face D do corpo central. Na figura 3.7 faz-se a representação esquemática dos elementos descritos neste parágrafo.

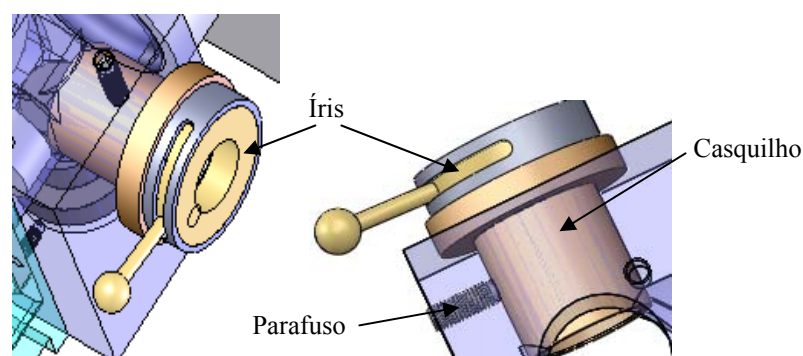


Figura 3.7 - Representação esquemática do casquilho com o sistema íris-lente montado no corpo central.

3.2.4 - Espelho com piezoeléctrico

Num interferómetro o método mais comum para introduzir uma diferença de fase entre os feixes objectos e referência é por meio de um elemento piezoeléctrico que move um espelho cuidadosamente colado no piezoeléctrico.

Uma mudança de fase pode ser introduzida no feixe de referência montando um espelho no braço de referência num elemento piezoeléctrico. Assim, pode ser dado um deslocamento muito pequeno. Isto corresponde a um passo de fase entre os feixes objecto referência, dado que o comprimento do braço de referência é alterado. A situação é esquematizada na figura 3.8 onde o deslocamento do espelho é denotado por dr .

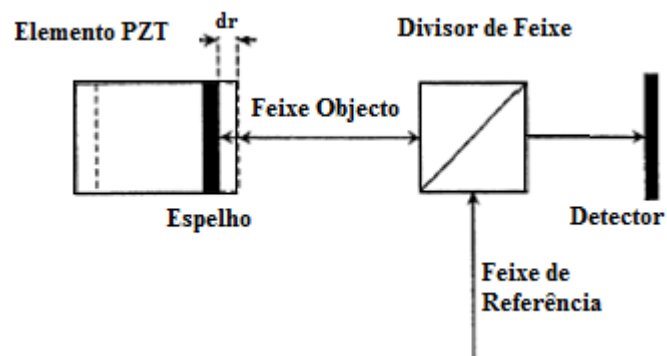


Figura 3.8 - Phase stepping com um elemento piezoelétrico [2].

A peça que suporta o piezoelétrico tem uma geometria exterior circular e no centro a forma do PZT. Assim, o elemento piezoelétrico fica coaxial com o suporte, figura 3.9.

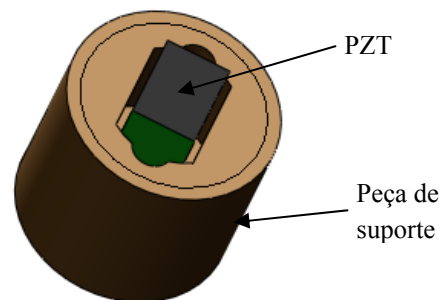


Figura 3.9 - Peça de suporte do piezoelétrico.

A peça possui ainda a furação para a passagem dos fios eléctricos do PZT. O espelho necessita de ser colado sobre o PZT, tendo um especial cuidado para garantir que o espelho fique perpendicular ao eixo do movimento de translação. Na figura 3.10 com o espelho colado do PZT e por sua vez o PZT encaixado na peça 8.

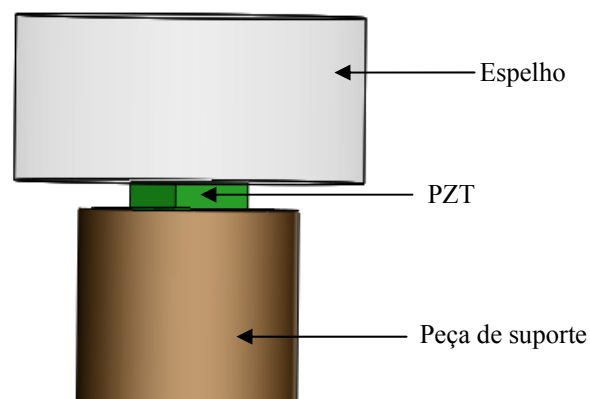


Figura 3.10 - Peça 8 com o piezoelétrico e o espelho.

Uma outra peça serve de suporte à peça 8. Fixa todas as peças necessárias ao PZT e mantém-nas no bloco central. Esta peça de apoio tem um furo roscado ao centro onde um parafuso M4 roscado permite o ajuste do PZT ao salto de fase necessário ao sistema. Na figura 3.11 está representada de todo o sistema apoio ao PZT.

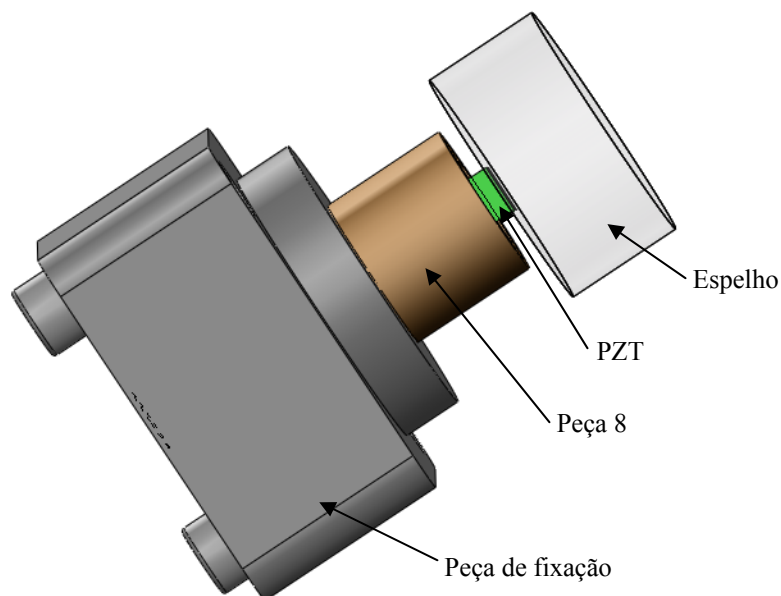


Figura 3.11 - Sistema completo do apoio do piezoelétrico.

3.2.5 - Espelho para o *Shear*

O espelho para fazer o *Shear* é colado cuidadosamente na peça que é designada por peça 2. Este espelho é o que vai criar a inclinação para se ter o *Shear* necessário para a medição da deformação e da rotação. Na figura 3.12, está representada a peça 2 com o espelho.

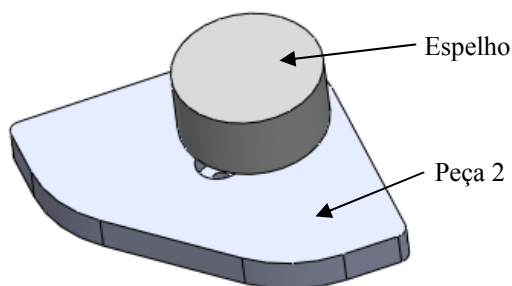


Figura 3.12 - Espelho montado no suporte (peça 2).

A peça 2 está ligada a uma outra peça (peça 3) que serve de apoio e mantém todo o sistema de inclinação do espelho fixo ao corpo central. A ligação entre a peça 2 e a 3 é feita por intermédio de uma mola,

havendo uma esfera entre as duas peças, que funciona como rótula e que permite um movimento de rotação entre si. O movimento de rotação é controlado por dois parafusos micrométricos que executam, com elevada precisão, a inclinação do espelho, obtendo-se, desta forma, o *Shear* pretendido. Na figura 3.13, está representado esquematicamente o sistema de inclinação do espelho para a realização do *Shear*.

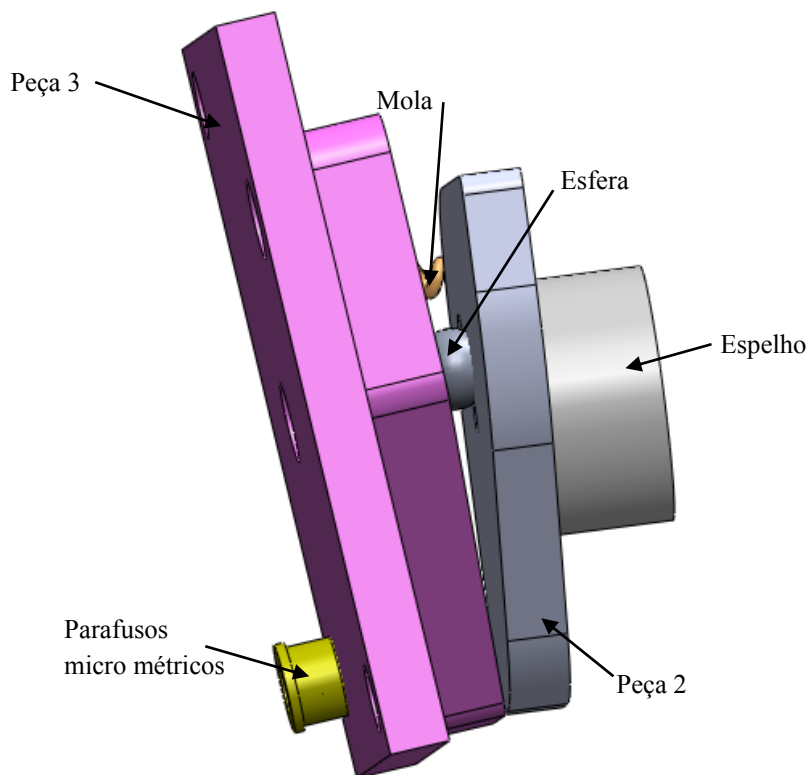


Figura 3.13 - Sistema para criar o *Shear* no espelho.

A peça 3 tem ainda 2 furos para a manter fixa ao bloco central, uma pequena mola que está colada nas duas peças e uma cavidade onde se encontra a esfera que funciona como rótula e que permite a inclinação do espelho.

3.2.6 - Câmara CCD

Para a fixação da câmara CCD ao sistema, e tendo em atenção que as câmaras usam o mesmo sistema de fixação, projectou-se um casquilho para que possam ser usado em qualquer câmara. Devido à dificuldade de maquinar o casquilho no próprio bloco central foi feito o casquilho com a rosca apropriada e posteriormente foi colado ao bloco central.

3.3 - Fabrico e montagem do sistema *Shear*

Após a fase do desenvolvimento fabricaram-se as peças necessárias ao sistema *Shear*. Como se pretende construir um sistema de metrologia de elevada precisão, teve-se um grande cuidado no fabrico de cada um dos seus componentes. Assim, para a correcta execução de todas as peças foi necessário utilizar um elevado tolerânciamento dimensional e geométrico. Mesmo após o fabrico e montagem dos elementos fez-se a verificação de todos os alinhamentos, e em caso de não satisfazer as condições fizeram-se novos elementos.

Inicialmente foi necessária a preparação de blocos de uma liga de alumínio existente no armazém do Laboratório de Oficinas de Mecânica (LOM). Para se proceder à preparação dos blocos foi utilizada a fresadora universal bem como a serra de fita também existente no LOM. A maior parte peças foram maquinadas numa fresadora CNC (Dekel Maho 63 V), esta máquina permite o fabrico de peças com um elevado rigor dimensional. Na figura 3.14 pode ver-se execução de uma peça na máquina CNC (*Computer Numerical Control*) existente no Laboratório de Fabrico Assistido por Computador (LFAC).



Figura 3.14 - Peça a ser executadas na CNC do LFAC.

Foi elaborada uma folha de inspecção para o controle dimensional das peças maquinadas e garantir que estas estariam dentro do tolerânciamento exigido, no anexo B encontra-se a folha de tolerânciamento bem como todas as cotas que foram sujeitas a verificação precisa. Sempre que alguma das cotas não estava dentro do tolerânciamento pretendido era excluída era feita a verificação e a interpretação das razão pela qual as dimensões estavam fora do tolerânciamento pretendido. As ferramentas utilizadas na execução das diferentes peças nem sempre eram as mais apropriadas para a maquinagem de alumínio, esta era a principal razão pela qual foi necessária a execução por diversas vezes de algumas das peças.

Também existiam peças de revolução e foi necessário recorrer a máquinas ferramentas convencionais, nomeadamente, o torno mecânico e a furadora. Estas máquinas embora não possuindo o rigor da CNC também permitem obter peças mecânicas com as dimensões pretendidas. Na figura 3.15 pode observar-se a fase de maquinagem nas máquinas ferramentas convencionais. O controlo dimensional foi feito utilizando instrumentos de metrologia com elevada resolução, da ordem do micrómetro.



Figura 3.15 - Maquinagem das peças nas máquinas ferramentas convencionais.

O sistema de interferometria óptica requer uma elevada precisão no alinhamento de todos os elementos que servem de suporte ao equipamento óptico. Deste modo, é exigido a cada um destes componentes uma elevada precisão geométrica e dimensional. Na fase de acabamento houve necessidade de recorrer a operações de polimento, de limpeza e desengorduramento com acetona.

Na figura 3.16 são apresentadas as diversas peças executadas junto de uma régua metálica para se poder ter uma noção mais exacta em relação às dimensões do sistema *Shear* desenvolvido nesta dissertação



Figura 3.16 - As peças do sistema *Shear*.

Após a montagem e verificação do sistema *Shear*, procede-se à pintura das regiões do sistema onde ocorre reflexão da luz, finalmente executaram-se as colagens dos elementos ópticos necessários. Para a pintura das peças do interior do sistema recorreu-se a uma tinta preta opaca, de forma a eliminar as possíveis reflexões internas que poderiam resultar na diminuição do contraste da imagem e reflectindo-se na qualidade da medição.

3.3.1 - Procedimentos de maquinagem

Neste ponto fez-se uma análise dos procedimentos de maquinagem para executar as diferentes peças do sistema *Shear*, bem como o tempo necessário para as obter. É de salientar que está, apenas, apresentado a fase final da maquinagem, não estando contabilizados os tempos de preparação da máquina nem todos os testes que foram realizados até a obtenção de uma peça final, com a qualidade exigida na obtenção de um sistema eficiente.

Os componentes do sistema foram modelados num sistema de CAD (*Computer Aided Design*) tridimensional denominado SolidWorks. Este sistema permite criar o modelo tridimensional dos elementos, implementar a montagem do conjunto de todos os elementos do sistema *Shear*, podendo reconstruí-lo tridimensionalmente e verificar possíveis interferências. É também no sistema de CAD que é feita a preparação do modelo para ser exportado para um software de CAM (*Computer Aided Manufacturing*), essa preparação consiste na criação de um novo sistema de eixos, que corresponde ao que será utilizado na maquinação da máquina CNC e à conversão do modelo criado em Solidworks para a extensão de parasolid. Após esta fase preparatória, o modelo é exportado para o software de CAM utilizado, que no caso presente designa-se por MasterCam X. Neste programa executa-se a simulação da maquinação, permitindo verificar possíveis erros de trajetórias ou de parâmetros de maquinação e gera-se o código CNC que é enviado para a máquina de comando numérico.

Na figura 3.17 pode ver-se um exemplo de simulação *Wireframe* no software de apoio à programação da maquinação.

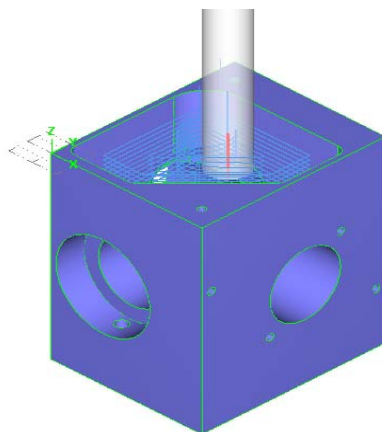


Figura 3.17 - Simulação de maquinação.

A fresadora CNC existente no LFAC funciona com um sistema de dois eixos e meio, isto é, executa a maquinação no plano “XY” e o eixo Z permite somente o movimento da árvore na vertical, sentido ascendente e descendente. Assim, é necessário ter um cuidado especial durante a modelação tridimensional de uma peça para ser maquinada nesta máquina: a face da maquinação, onde ocorrem os movimentos de avanço, deverá corresponder ao plano “XY” e o movimento de penetramento da ferramenta deverá corresponder ao eixo Z. Tendo como exemplo a figura 3.17, para a execução corpo central na máquina de comando numérico é necessário exportar 6 ficheiros do software de CAD, com os respectivos sistemas de eixos, para o programa de CAM. Por sua vez, no programa de CAM é necessário gerar-se o programa individual para cada uma das faces. Depois de uma análise cuidada das diferentes simulações e da verificação dos programas CNC gerados pelo software CAM é necessário enviar o programa para máquina de comando numérico. Este, é enviado do computador para a fresadora de comando numérico via cabo, com uma ligação RS232. A máquina CNC possui uma consola onde pode ser implementada a simulação da maquinação que se pretende executar. Normalmente, as simulações realizadas no computador são coincidentes com as da máquina CNC, contudo é conveniente fazer-

se esta verificação para despistar todas as possibilidades de ocorrência de erros ou possíveis acidentes na maquinagem.

Fabricados todos os elementos do sistema *Shear*, determinaram-se os tempos necessários para a sua execução. Estes elementos tiveram tempos de maquinagem muito diversificados, tendo sido executadas de modo a obter as tolerâncias dimensionais e geométricas requeridas. Os tempos de preparação das máquinas para a execução das peças foram contabilizados em 63 minutos. A fase de simulação e programação das peças em 68 minutos. O tempo de maquinagem na fresadora CNC foi de 155 minutos. Parte das peças executadas neste trabalho foram maquinadas em máquinas ferramentas convencionais, tendo sido contabilizados 120 minutos para a sua execução. No anexo C encontra-se com maior detalhe a distribuição dos tempos de maquinagem para o fabrico das diferentes peças do sistema *Shear*.

3.3.2 - Montagem do sistema óptico

A montagem do sistema tem por base o corpo central, pois será neste que todos os outros elementos vão ajustar-se. Na figura 3.18 está representada, em perspectiva explodida, todos os elementos do sistema *Shear*.

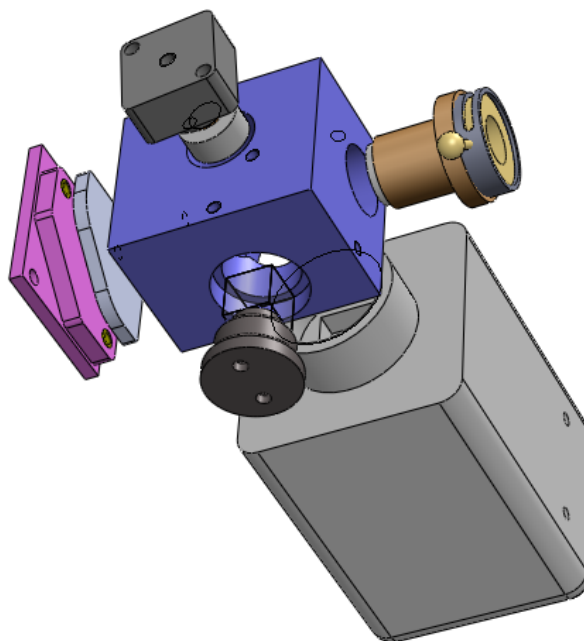


Figura 3.18 - Sistema *Shear* representado em perspectiva explodida.

Para garantir o correcto posicionamento e alinhamento de todos os componentes, foi necessário, durante o processo de desenvolvimento, impor tolerâncias gerais finas (ISO 2768 – fH) e ajustamentos específicos para uma correcta funcionalidade de alguns movimentos entre elementos. Assim, o ajuste entre os furos do corpo central e as peças 1 e 5 (ver anexo A) tiveram um ajustamento do tipo H6/g5 (deslizante). Os eixos dessas peças

são coaxiais com os respectivos furos. Para garantir o alinhamento óptico do feixe que vem da lente com o divisor de feixe, há que garantir a perpendicularidade entre os eixos das peças 1 e 5. O paralelismo entre os espelhos e as faces do divisor de feixe é garantido pela colagem rigorosa dos espelhos nas faces dos respectivos suportes. Estas têm uma elevada planeza (0.04 mm), garantindo o paralelismo dos espelhos. Os eventuais desalinhamentos e desequilíbrios nos braços do interferómetro podem ainda ser corrigidos pela rotação da base do divisor de feixe, translação do piezoeléctrico e translação da lente. Na figura 3.19, pode ver-se as peças depois de terem sido executadas e o processo de montagem.



Figura 3.19 - Alguns dos elementos maquinados e a fase de montagem.

É feito um controlo dimensional cuidadoso a todas as peças e verificados se os ajustamentos deslizantes estão de acordo com o projectado.

Como os toleranciamentos geométricos e dimensionais são muito apertados, houve a necessidade recorrer a operações de rectificação para obter o toleranciamento exigido. Com o intuito de melhorar o acabamento superficial de algumas peças procedeu-se à lixagem de algumas delas, usando lixa com granulometria fina. Antes da montagem dos elementos do sistema procedeu-se à sua limpeza e desengorduramento com acetona.

As peças suporte foram fabricadas numa liga de alumínio que tem uma elevada reflectividade, havendo a necessidade, antes de fixar os componentes ópticos, de pintar de negro as regiões por onde passa a luz e limitar o ruído óptico provocado pelas reflexões parasitas.

O procedimento de colagem dos elementos ópticos (lentes e espelhos) aos respectivos suportes deverá ser feito com muito cuidado para não suja-los, evitando o toque com os dedos nas superfícies desses elementos e que o excesso de cola os cubra. É necessário limpar cuidadosamente os espelhos e as lentes e só depois é que se procede à colagem recorrendo a um adesivo estrutural com base epóxida.

Na figura 3.20.a) está representado o modelo tridimensional de conjunto do sistema *Shear* e na figura 3.20.b) apresenta-se o sistema real que foi implementado neste trabalho.

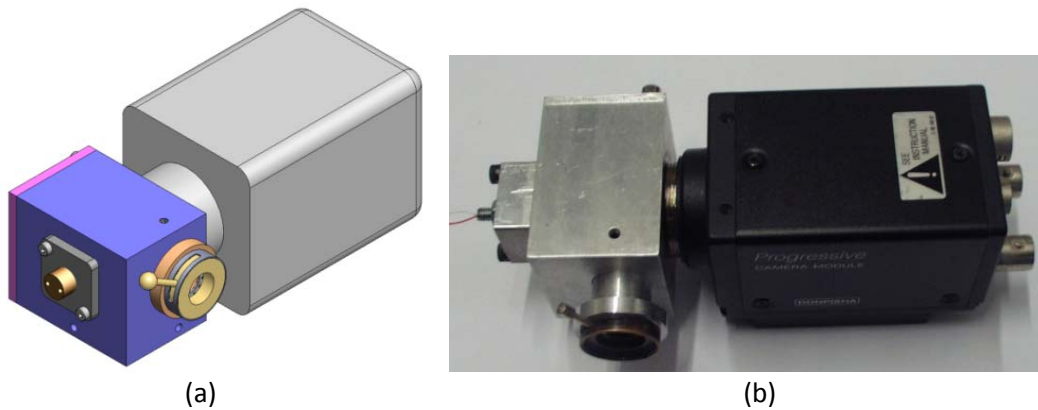


Figura 3.20.a) - O modelo tridimensional de conjunto do sistema *Shear*; 3.20.b) - O sistema *Shear* depois de montado.

3.4 - Calibração do sistema óptico

Após o fabrico do sistema *Shear* foi necessário calibrá-lo, a montagem do sistema foi realizada sobre uma mesa óptica da Newport®, apoiada sobre um maciço de betão, situação que confere à montagem um elevado isolamento às vibrações externas.

A qualidade das medições do sistema *Shear* depende muito dos componentes ópticos utilizados e da sua disposição. Houve um especial cuidado na escolha dos componentes ópticos com baixa rugosidade, tipicamente $\lambda/10$.

No caso da sua montagem, a optimização de resultados é conseguida através de pequenos ajustes na posição dos componentes, seguindo um processo iterativo até se conseguir a posição óptima. O procedimento que se designa por calibração do sistema óptico, pode ser mais facilmente concretizado partindo de um padrão conhecido. Um padrão com diferentes níveis de tamanhos e é utilizado então para um mais fácil acerto e focagem da imagem, figura 3.21, em que se foca de forma decrescente até se conseguir focar os números mais pequenos.

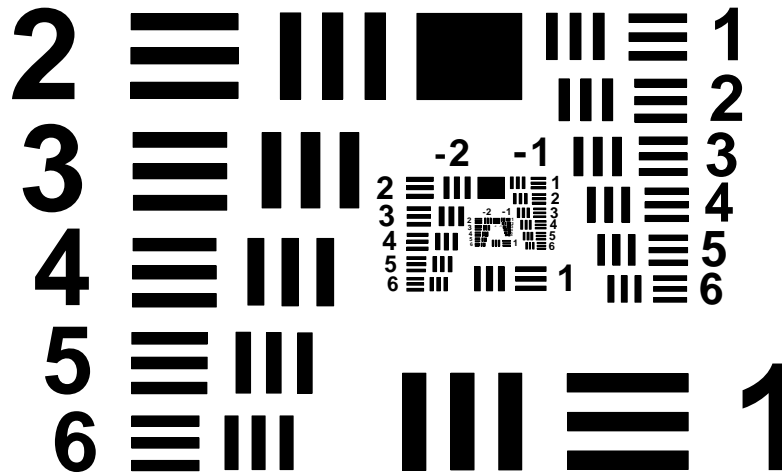


Figura 3.21 - Padrão da calibração óptica [3].

Na primeira fase do procedimento da calibração o espelho é retirado do piezoelétrico para que só exista um caminho óptico entre o padrão e a câmara. O eixo óptico e a focagem são então ajustados através da rotação do divisor de feixe, translação da lente e ou translação da câmara. Depois de acertadas as posições dos componentes procede-se à focagem através do segundo caminho óptico (espelho do piezoelétrico), sendo então retirado o espelho do *Shear*. O procedimento é repetitivo até que ambas as imagens surjam perfeitamente focadas. Por equilíbrio na focagem obtém-se a paridade entre os caminhos ópticos do interferómetro de Michelson e a consequente optimização do sistema. Na figura 3.22 podemos ver a forma do procedimento de calibração.

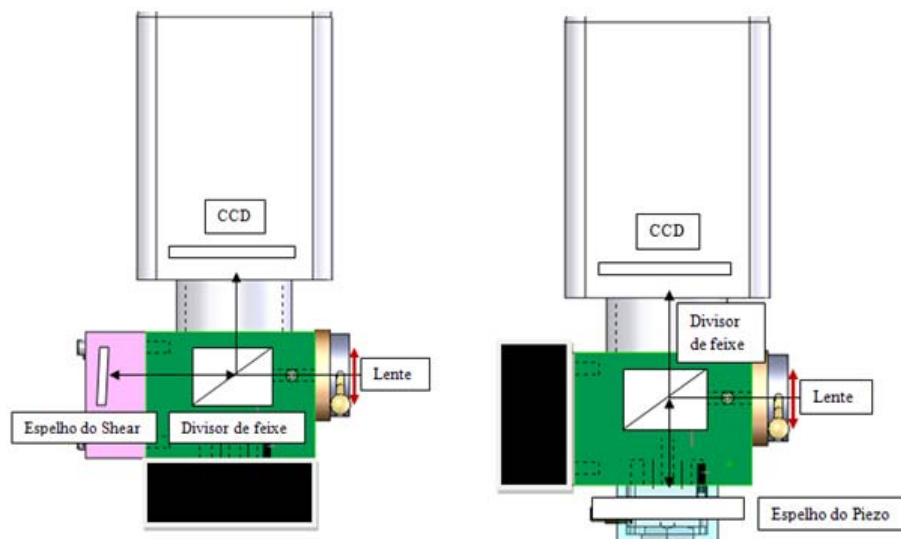


Figura 3.22 - Procedimento de calibração [3].

Finalmente, com todos os componentes ópticos montados procede-se então à correcção das distorções ópticas entre as imagens formadas pelos dois caminhos ópticos, para isso foi utilizado a grelha representada na figura 3.23.

Figura 3.23 - Procedimento de correcção das distorções ópticas [3].

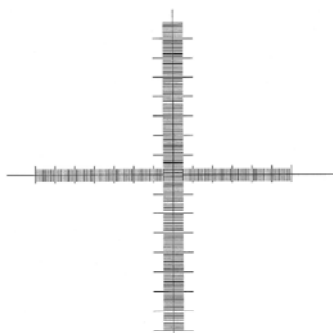


Figura 3.24 - Processo de ajuste da translação da imagem.

Na calibração de fase de medição foi utilizada uma placa encastrada iluminada por uma luz Laser com λ de 532 nm. O deslocamento de Shear utilizado foi de 15mm, na figura 3.25 podemos observar o padrão de ajuste da translação da imagem horizontal.

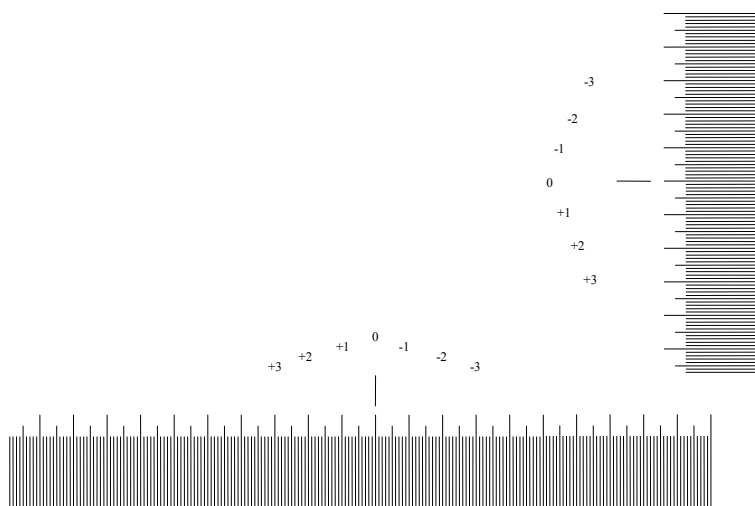


Figura 3.25 - Processo de ajuste da translação da imagem (translação horizontal de 15mm).

Através do carregamento uniforme da placa obtém-se as franjas de interferência correspondente ao campo de rotação sofrido pela placa e que se apresentam na figura 3.26.

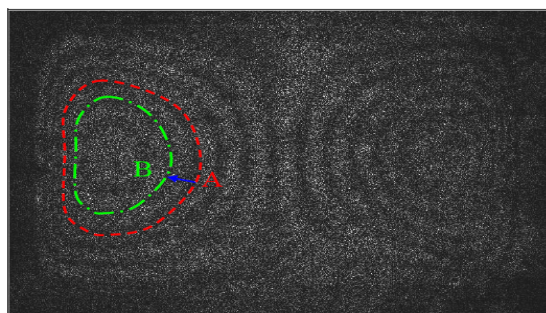


Figura 3.26 - Franjas de interferência da medição [3].

3.6 - Sistema *Shear*

O protótipo final do sistema *Shear* constituído pelo interferómetro óptico e pela câmara CCD, figura 3.27. A elevada flexibilidade e as reduzidas dimensões da estrutura garantem a estabilidade do alinhamento óptico de todos os componentes, a facilidade de manuseamento e de transporte.

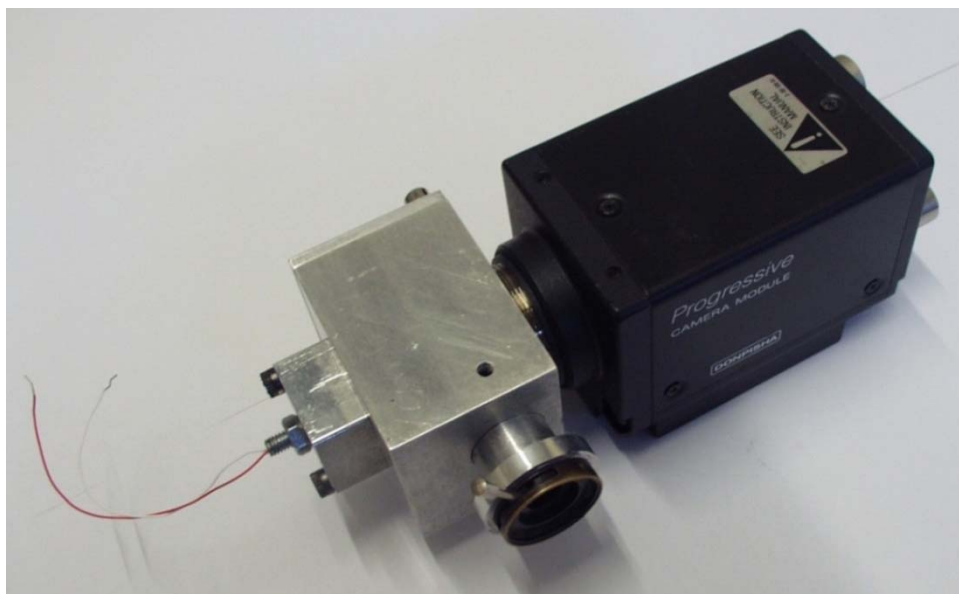


Figura 3.27 - Sistema *Shear*.

Durante o desenvolvimento deste sistema foram estudadas várias soluções para melhorar a eficiência e automatização do sistema, nomeadamente o controlo automático da inclinação e rotação do espelho que implementa o *Shear*. O estudo desta e outras soluções estão apresentadas no anexo E. A peça de suporte do PZT também foi alvo de diversas alterações sendo que a solução final aquela que melhor satisfazia as necessidades de ajuste do sistema.

3.7 - Referências

1. Santos, Fernando. Novos Métodos de Interferometria de Speckle. Tese de Doutorado. Porto: FEUP, 2003.
2. Monteiro, Jaime. Desenvolvimento de um sistema de interferometria Holográfica (ESPI) para a análise de estruturas sob solcitações estáticas e dinâicas : Tese ded Mestrado. Porto, FEUP 1998.
3. Lopes, Hernani. *Desenvolvimento de Técnicas Interferométricas, Contínuas e Pulsadas, Aplicadas à Análise do Dano em Estruturas Compósitas*. Tese de Doutorado. Porto : FEUP, 2007.
4. Chousal, José A. G. *Técnicas de Processamento de imagem obtidas por métodos ópticos em análise experimental de tensões*. Tese de Doutorado. Porto : FEUP, 1999.

Capítulo 4 - Estudo experimental e numérico do campo de rotações e deformações

4.1 - Introdução

O protótipo *Shear* desenvolvido neste trabalho e descrito no capítulo anterior tem por objectivo final medir os campos de deformações e rotações de uma superfície solicitada. A elevada resolução e sensibilidade deste sistema requer grande precisão no alinhamento e ajuste de todos os elementos que compõem a montagem experimental. A dupla iluminação laser deverá ter a mesma orientação para que o vector sensibilidade apresente só componente no plano. O sistema de formação de imagem, lente mais abertura óptica, deverá ser ajustada para permitir a resolução completa do *Speckle*, isto é, no plano de imagem o grão deverá possuir a mesma dimensão do pixel do CCD. A sensibilidade do sistema deverá adequar-se à gama medição, podendo variar em função do desfasamento, criado entre as duas frentes de onda, e do vector sensibilidade, através do ângulo dos lasers.

As correntes de convecção e as perturbações externas contribuem para o aumento da descorrelação parcial ou total do *Speckle*, com a consequente introdução de ruído nas medições. Sendo elementos indesejáveis, estes poderão ser minimizados através da realização das montagens em mesas anti-vibratórias e em ambientes controlados. O aumento da resolução espacial da fase obriga a aplicação da técnica temporal de salto de fase. Esta é realizada a partir de mapas de fase desfasados de uma quantidade de fase fixa, criado através da translação do espelho, o qual é actuado por um piezoeléctrico. Para garantir maior estabilidade da medição é importante que a resposta do material piezoeléctrico, estabilização do espelho e aquisição das imagens se realizem num curto espaço de tempo.

Neste capítulo descrevem-se a análise dos campos de rotações e de deformação no plano de uma viga encastrada numa extremidade e submetida a um deslocamento na extremidade livre. A viga em flexão foi escolhida por ser de simples estudo e por existem soluções analíticas estabelecidas. Por outro lado, a montagem experimental da viga é de fácil implementação sobre uma mesa anti-vibratória, sendo o seu encastramento materializado pela sua fixação à mesa através de um maciço em Aço e o deslocamento aplicado por translação de um micro-posicionador. Neste estudo foram usadas duas vigas com propriedades mecânicas distintas, isotrópico (liga de alumínio) e ortotrópico (madeira). Deste modo, pretende-se demonstrar o potencial desta técnica na medição das deformações e rotações não só em materiais com o comportamento isotrópico, mas também, ortotrópico.

4.2 - Montagem experimental

Na figura 4.1 apresenta-se esquematicamente a montagem experimental das vigas em consola, usada para a medição dos campos de rotações e deformações no plano. Esta foi realizada sobre uma mesa anti-vibratória da marca NEWPORT® de forma a isolar toda a medição de perturbações exteriores. O espaço envolvente à montagem isolado por painéis para prevenir a influência das correntes de convecção durante as medições.

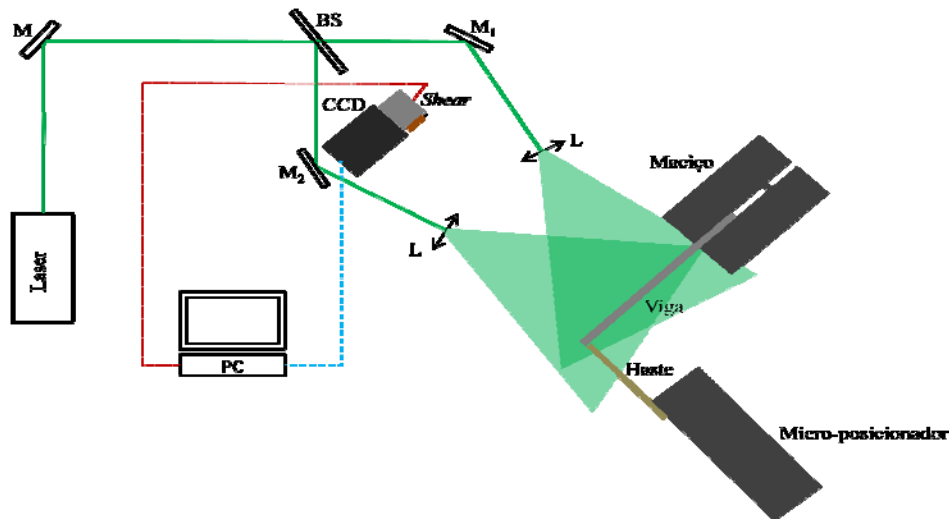


Figura 4.1 - Representação esquemática da montagem experimental usada para a medição dos campos de rotações e deformações no plano para as vigas em consola.

O encastramento da viga é garantido pela fixação de uma das extremidades da viga a um maciço em Aço de elevada rigidez, o qual é fixo à mesa óptica por intermédio de 12 parafusos M6, figura 4.2. O micro-posicionador da marca Micro-Control® é fixo à mesa e alinhado à extremidade livre da viga. Neste é montada uma haste que permite aplicar, segundo a perpendicular ao plano da viga e ao longo da sua mediatriz, deslocamentos controlados com a precisão de 0,1 microns.

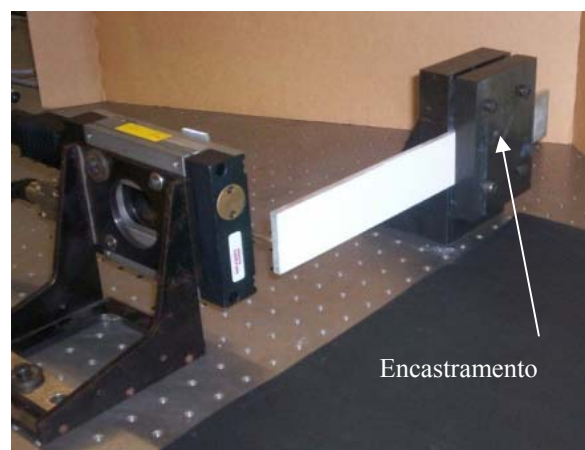


Figura 4.2 - Montagem experimental da viga encastrada-livre.

A montagem do protótipo é realizada de forma a alinhar o sistema óptico com o plano médio da superfície de medição. Um laser da Coherent® modelo VERDI com o comprimento de onda de $\lambda = 532nm$ é usado para criar a dupla iluminação da superfície, figura 4.3. O feixe proveniente do laser é dividido em dois pelo divisor do feixe laser (BS- Beam Splitter), sendo o ângulo de iluminação controlado pela inclinação de dois espelhos (M1; M2). A iluminação homogênea da superfície é efectuada pela montagem de lentes após os espelhos, sendo a abertura do feixe controlada em função da sua distância. A superfície da viga é coberta por uma camada fina de tinta removível para aumentar e uniformizar o índice de reflexão da luz laser.

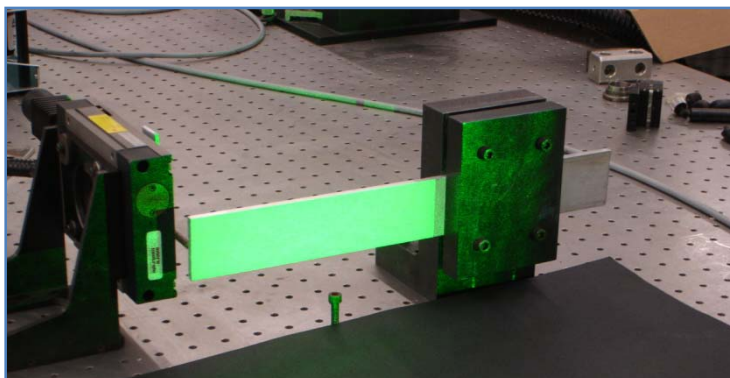


Figura 4.3 - Iluminação da viga com os dois feixes.

O sistema de formação de imagem é ajustado de forma a englobar todo o campo de medição e resolver o padrão de *Speckle*, através focar o plano de medição. Neste último caso, um padrão de calibração é montado junto à superfície de medição, sendo a distância da lente ao plano de observação afinado para obter o máximo contraste na imagem. O desfaseamento entre as duas frentes de onda criadas pelos braços do interferómetro de Michelson é ajustado através da rotação do espelho por um parafuso micrométrico, sendo o seu valor e orientação controlados pela observação de uma régua de calibração montada junto à superfície. A calibração do salto de fase, usado na técnica temporal de salto de fase, é realizada em função da translação do espelho e do correspondente movimento produzido nas franjas. A posição do espelho é definida pela actuação de um piezoeléctrico que lhe está acoplado. O piezoeléctrico é aqui controlado pelo nível de tensão gerado por uma placa da National Instruments® PCI-6722 via amplificador Burleigh® PZ-70. Uma câmara de elevada resolução JAI® modelo CV-M2 e uma placa de aquisição de imagem Matrox® modelo Hélios XCL são usadas para aquisição das imagens. O valor tensão é regulado entre dois níveis até se obter um salto fase de 2π , correspondendo a ausência de movimento das franjas.

A fase da interferência entre as duas frentes de onda é gravada numa câmara CCD na forma de intensidade I . Para aumentar a sua resolução espacial, além do comprimento de onda da luz laser, é usada nesta medição a técnica temporal de fase com salto fixo de $\pi/2$. Com efeito, é adquirida uma sequência de quatro imagens para realizar o cálculo da fase, podendo este ser determinado de acordo com a equação:

$$\Phi_i(x, y) = \arctan \frac{I_{i,4}(x, y) - I_{i,2}(x, y)}{I_{i,1}(x, y) - I_{i,3}(x, y)} \text{ com } i = A, B \quad \text{Equação 4.1}$$

Correspondendo os índices 1, 2, 3 e 4 das imagens aos saltos de fase de $0, \pi/2, \pi$ e $3\pi/2$, respectivamente.

A posição da haste é ajustada para o limiar de contacto com a viga, sendo esta tomada como a posição de referência, figura 4.4. A deformação da viga é criada pela aplicação de um deslocamento na sua extremidade livre, cujo valor é ajustado via controlador da Micro-Control[®]. O micro-posicionador tem acoplado ao movimento da haste um sistema de codificador digital, o que permite afinar com elevada precisão e garantir a repetibilidade da deformação da viga.

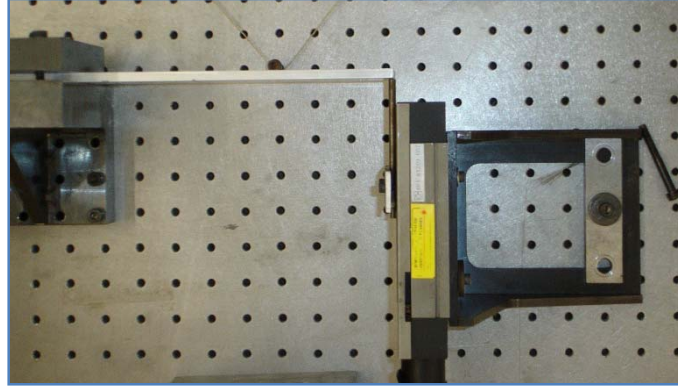


Figura 4.4 - Aplicação de deslocamento na extremidade livre viga.

Para as duas posições da viga, referência e deformada, são adquiridas dois pares de quatro imagens, uma por cada iluminação laser. Por interferência das fases de referência $\Phi_A(x, y)$ e de deformada $\Phi_B(x, y)$ é obtido o mapa de fase correspondente ao movimento sofrido pela superfície da viga entre os dois instantes da medição [7], podendo este ser determinado conforme a expressão:

$$\Delta\phi(x, y) = \arctg \frac{\text{sen}(\Phi_B(x, y)) - \text{sen}(\Phi_A(x, y))}{\text{cos}(\Phi_B(x, y)) - \text{cos}(\Phi_A(x, y))} \quad \text{Equação 4.2}$$

Na figura 4.5 apresenta-se esquematicamente o diagrama que conduz à determinação do mapa de fase a partir dos oito registos da frente de onda e recorrendo à técnica de modelação temporal de fase deformação. Este mapa de fase filtrado foi obtido para um deslocamento na extremidade livre da viga de alumínio de 55 μm e com desfasamento entre as frentes de onda de 15 mm.

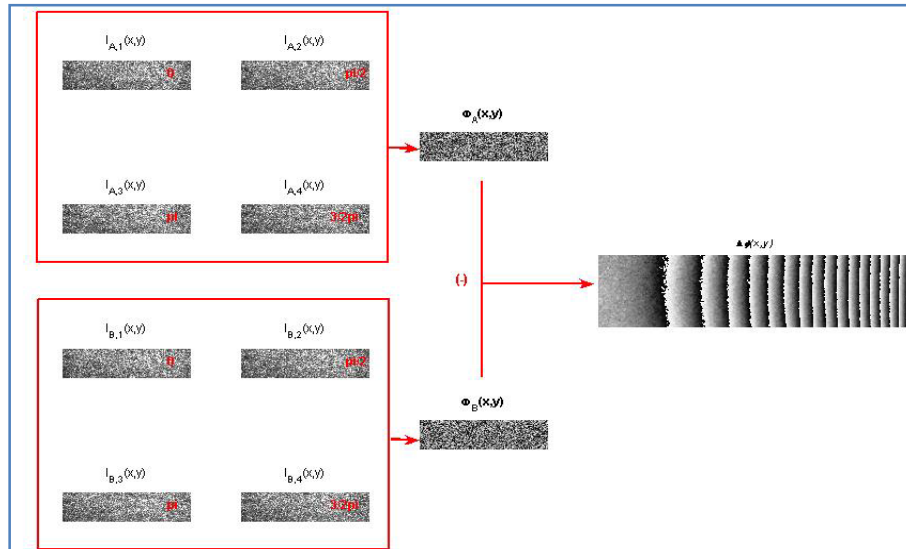


Figura 4.5 - Diagrama para a determinação do mapa de fase a partir de 8 registos da intensidade holográfica, concretizada pela técnica de salto de fase de 4 imagens (técnica de modelação temporal de fase).

Os mapas de fase estão normalmente contaminados por ruído de medição de alta frequência, provocado pela descorrelação parcial ou total do *Speckle*. O ruído de *Speckle* por afectar a qualidade da medição é indesejado e pode ser globalmente atenuado através de aplicação de técnicas filtragem. Estas têm como principal objectivo melhorar a relação sinal/ruído sem, no entanto, destruir a informação de fase, fundamental para a determinação do campo contínuo de medição. O filtro Média foi aqui utilizado para eliminar o ruído de alta frequência [1]. Refira-se que o mapa de fase apresenta descontinuidades de fase, as quais impossibilitam a aplicação directa deste tipo de filtros. Esta dificuldade é ultrapassada através da análise da informação de fase no domínio complexo [1]. No caso específico deste trabalho, a determinação dos mapas de fase requer a combinação de 8 mapas de interferência, estando naturalmente contaminados por ruído de *Speckle*. Desta forma, sucede adição do ruído de *Speckle*, o qual impede a visualização das franjas no mapa de fase. A aplicação do filtro de fase Média permite remover parcialmente este ruído e aumentar o contraste das franjas, tornando-as visíveis, figura 4.5.

Os mapas de fase apresentam distribuições descontínuas da fase, definidas pela modelação espacial da amplitude do campo de medição. Para a reconstrução do campo contínuo, correspondente ao campo de medida, é necessário remover correctamente estas descontinuidades através da aplicação dos métodos de desembrulhar da fase (*Unwrapping*). Neste trabalho foi utilizado o método baseado na minimização da norma do erro, proposto Volkov et al. [2], por apresentar elevada robustez às inconsistências e pela sua rápida convergência para a solução. Na figura 4.6 apresenta-se o mapa de fase filtrado e o respectivo campo contínuo de medição obtido por aplicação do método de desembrulhar da fase implementado. Este resultado permite verificar que as transições de fase foram eliminadas correctamente, obtendo-se uma distribuição contínua do campo.

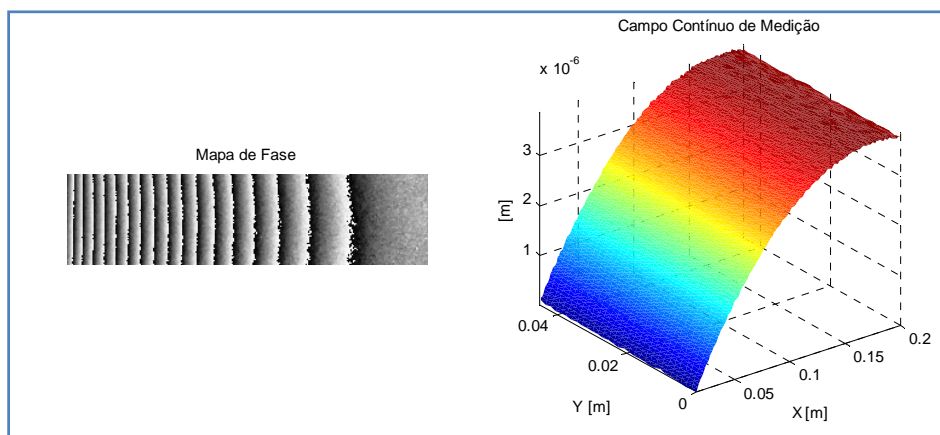


Figura 4.6 - Representação do mapa de fase (lado esquerdo) e do respectivo campo de medida.

Seguindo o procedimento descrito nesta secção são medidos os campos de rotação e deformação na superfície das vigas de alumínio e madeira, e que estão apresentados em seguida.

4.2.1 - Viga em alumínio

O modelo de viga em Alumínio na condição encastrada-livre utilizada na medição experimental, as suas características geométricas e as respectivas propriedades elásticas do material estão representados a seguir.

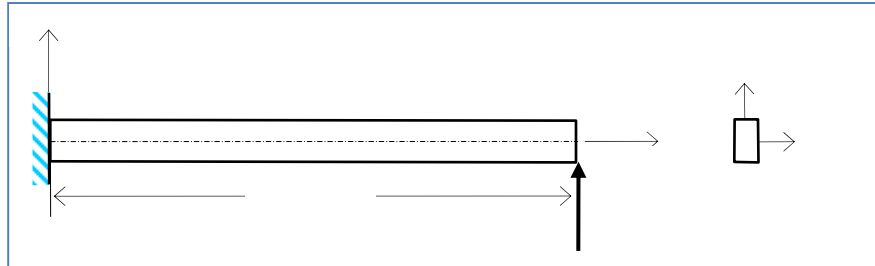


Figura 4.7 - Representação da viga encastrada-livre.

As características geométricas, elásticas e de carregamento aplicado na extremidade livre da viga são as seguintes:

$$l = 0,20 \text{ [m]}$$

$$E = 7 \cdot 10^{10} \text{ [Pa]}$$

$$b \text{ (largura)} = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ [m]}$$

$$I_z = \frac{b \cdot h^3}{12} = 8,1 \cdot 10^{-10} \text{ [m}^4\text{]}$$

$$h \text{ (espessura)} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ [m]}$$

$$\Delta = 70 \text{ } \mu\text{m}$$

Os campos de deformação e de rotação são obtidos a partir do vector sensibilidade definido no plano e fora-do-plano, respectivamente. A sua orientação depende das características geométricas da montagem experimental. Para melhor compreender a definição de vector sensibilidade e por ser este assunto de primordial importância para a medição do campo de deformações na superfície, é apresentado de seguida um estudo sobre a determinação do vector sensibilidade utilizando a dupla iluminação laser. Para o efeito, considerem-se duas iluminações laser orientados segundo o mesmo ângulo em relação à superfície e cujo sistema de formação de imagem do protótipo *Shear* se fixa na perpendicular à mediatriz da superfície, conforme se representa na figura 4.8.

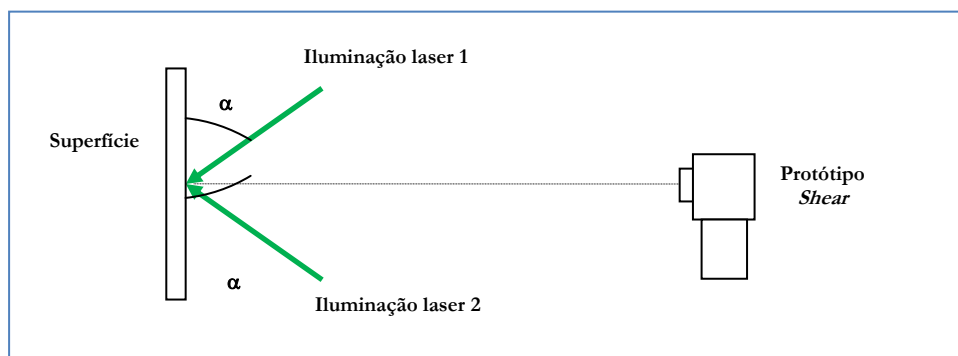


Figura 4.8 - Definição do vector sensibilidade para dupla iluminação.

Neste caso, os vectores sensibilidade em relação à iluminação são definidos pelas expressões 2.27 e 2.30 do capítulo 2 desta dissertação.

Estes dois vectores apresentam simultaneamente componentes no plano e fora-do-plano. Através da adição e subtracção dos vectores sensibilidade é possível obterem-se isoladamente as componentes no plano ou fora-do-plano [6], as quais se relacionam, respectivamente, com o campo de deformações e campo de rotações da superfície, de acordo com as expressões 2.28 e 2.31 do capítulo 2 desta dissertação.

A partir da montagem experimental da viga encastrada-livre, figura 4.7, determinaram-se os mapas de fase correspondentes às duas iluminações laser para $\alpha = 60^\circ$. Os mapas de fase filtrados são somados e subtraídos para se obterem os mapas de fase correspondente à rotação e deformação, respectivamente. Os mapas de fase medidos e filtrados e os mapas de fase da rotação e deformação, antes e após filtragem, estão representados na figura 4.9.

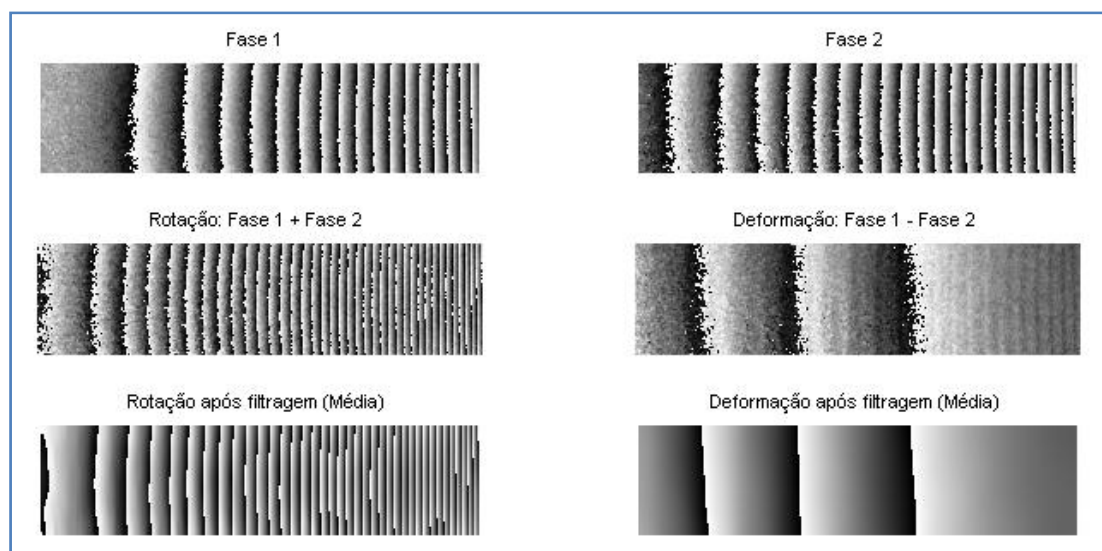


Figura 4.9 - Mapas de fase do campo de rotação e deformação para a viga de Alumínio.

Observando as franjas representadas na figura 4.9 verifica-se que estas apresentam uma distribuição aproximadamente paralela, sendo as franjas mais densas próximo do encastramento e da extremidade livre, respectivamente, para a rotação e deformação. Na rotação, as franjas junto à extremidade livre apresentam uma configuração curva em resultado da proximidade da aplicação do carregamento. Por outro lado, a análise comparativa entre os mapas de fase da rotação e deformação revela que o número de franjas no campo de rotações é muito superior ao da deformação. Isto significa que a sensibilidade do sistema é maior na rotação que na deformação devido ao ângulo $\alpha = 60^\circ$. A diminuição do ângulo do laser em relação à superfície permitirá aumentar a sensibilidade do sistema em relação à deformação. Todavia, a mesma alteração levará ao aumento do ruído de *Speckle* e à consequente diminuição na qualidade das franjas, revelada pela perda de contraste. Um factor fundamental para uma boa resolução do sistema *Shear* é a qualidade e intensidade da iluminação laser no objecto [5]. No caso em análise, em que a iluminação é feita a partir de duas direcções diferentes é importante que o ângulo de iluminação dos dois feixes seja igual, bem como a intensidade dos mesmos. Um outro cuidado a

ter em conta é o da verificação da não ocorrência de sombras, pois essas regiões não serão medidas, por isso deve evitar-se, sempre que possível, que elas ocorram ou se isso não for possível, garantir não se situam numa região importante na análise que se está a realizar.

A aplicação da técnica de desembrulhar a fase aos mapas de fase medidos, figura 4.9, permite obter os campos de rotações e deformações, cuja escala deverá ser ajustada em função do comprimento de onda do laser e do correspondente vector sensibilidade. Para a viga em estudo apresentam-se na figura 4.10 os campos de rotações e deformações ao longo do eixo x.

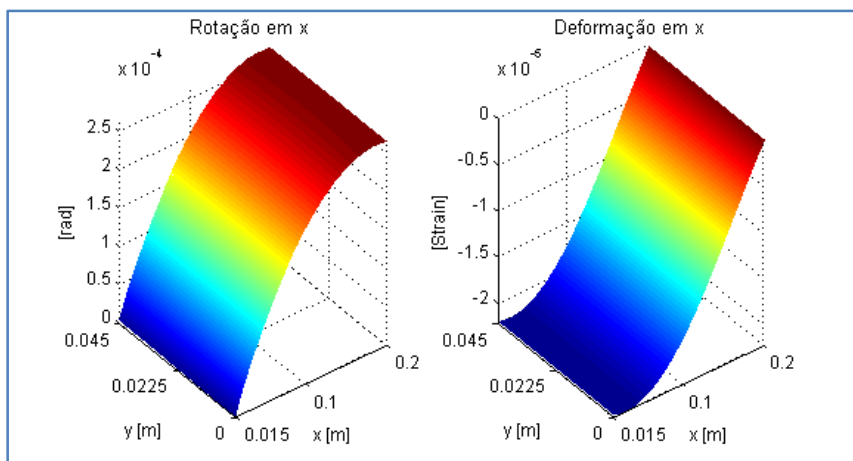


Figura 4.10 - Campos de rotação e deformação da viga de Alumínio na condição encastrada-livre e solicitada na extremidade livre.

A técnica utilizada permite comparar entre dois instantes os campos de rotação e deformação produzido durante o carregamento. Sendo esta por natureza uma medição relativa, torna-se necessário ajustar o valor absoluto destes campos. Tomando como referência a distribuição dos esforços ao longo de uma viga encastrada livre foi assumido o possuírem valor nulo na rotação e na deformação, respectivamente, junto ao encastramento e à extremidade livre, figura 4.10. Assim, verifica-se que a rotação é máxima na extremidade livre, o valor de 2.5×10^{-4} [rad], e a deformação é mínima junto ao encastramento, valor de -2×10^{-5} [strain].

4.2.2 - Viga em madeira

Neste ponto pretende-se demonstrar que as medições realizadas com o sistema *Shear* podem ser estendidas a materiais ortotrópicos, como é o caso da madeira. Um dos requisitos fundamentais para uma efectiva utilização da madeira é o exacto conhecimento das suas propriedades mecânicas. No entanto, a identificação e análise experimental do comportamento mecânico de modelação de madeira é um problema complexo, devido à sua variabilidade natural, e não homogeneidade anisotrópica [3]. Como as propriedades da madeira podem variar muito, função da espécie, origem, idade, grau de humidade, tipo de corte, etc., houve a necessidade de caracterizar a madeira de pinheiro bravo utilizada nos ensaios realizados. No sentido de

determinar o módulo de elasticidade da madeira na direcção longitudinal da viga realizam-se um conjunto de ensaios de tracção versus deformação, cujos resultados se apresentam no anexo D. Tomando a média dos módulos de elasticidade dos ensaios obteve-se para direcção longitudinal o valor 5.4 [GPa]. A viga de madeira de pinho bravo utilizada neste estudo é retirada da mesma secção e segundo a direcção dos provetes utilizados no ensaio de tracção, pretende-se assim garantir maior que o módulo de elasticidade da direcção longitudinal da viga é o mesmo que o identificado a partir dos ensaios de tracção. O ensaio da viga de madeira é realizado encastrada num bordo e solicitada na extremidade livre, sendo as características geométricas e de solicitação análogas às anteriormente apresentadas para a viga de Alumínio, figura 4.7.

Seguinte o procedimento igual ao apresentado para o ensaio da viga de Alumínio mediram-se os mapas de fase para cada iluminação. Por combinação destes mapas são determinados os mapas de fase correspondentes ao campo de rotação e deformação da viga. À semelhança do ensaio anterior apresentam-se na figura 4.11 e para a viga de madeira os mapas de fase filtrados e os mapas de fase dos campos de rotação e deformação antes e após filtragem.

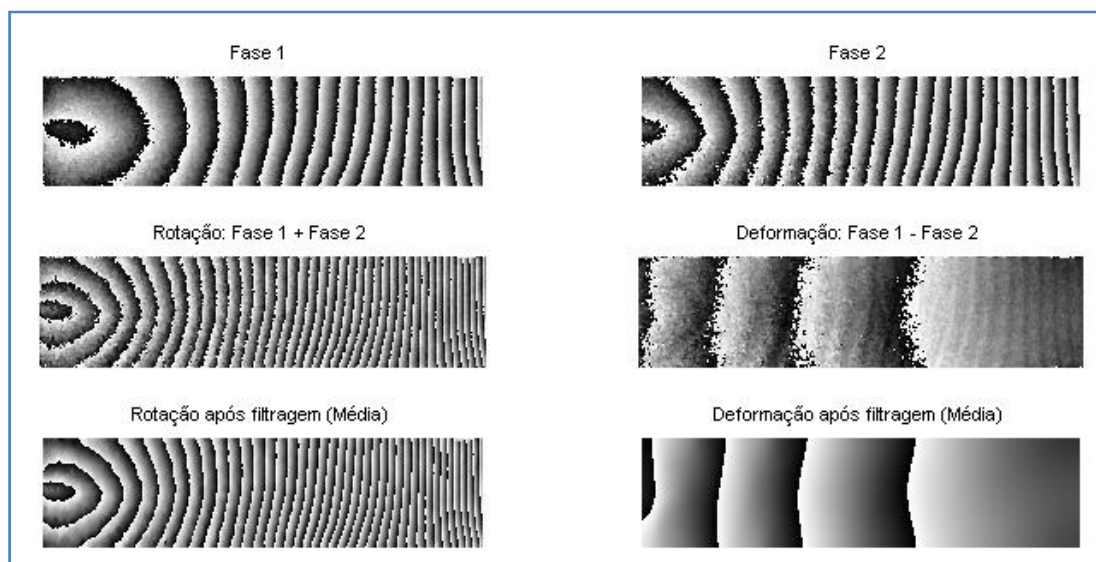


Figura 4.11 - Mapas de fase do campo de rotação e deformação para a viga de madeira.

A análise dos mapas de fase da figura 4.11 revela que existe uma maior densidade de franjas na rotação que da deformação, à semelhança do resultados obtidos para a viga de Alumínio. Observando a orientação das franjas verifica-se que estas deixaram de ser paralelas em relação ao encastramento e simétricas relativamente à mediatriz da viga, devido às propriedades de ortotrópicas da madeira.

Os campos de rotação e deformação são obtidos por aplicação da técnica de desembrulhar a fase aos respectivos mapas, sendo a amplitude ajustada em função do vector sensibilidade e do comprimento da luz laser. O valor absoluto dos campos foi ajustado tomando como referência o comportamento de uma viga encastrada-livre e carregada na extremidade livre, cujos campos se apresentam na figura 4.12. A análise da sua distribuição revela, como esperado, que apresentam um comportamento muito semelhante ao da viga em Alumínio, apresentando na extremidade livre o valor máximo da rotação de 2.5×10^{-4} [rad] e no encastramento o valor mínimo da deformação de -3.22×10^{-5} [strain].

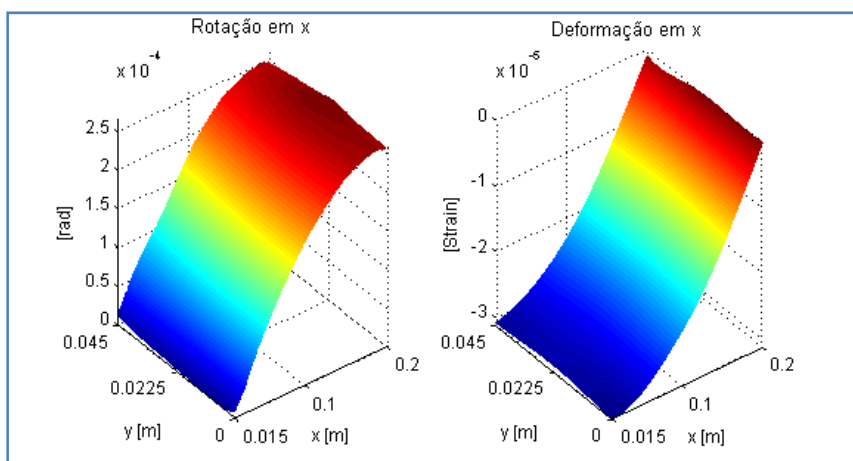


Figura 4.12 - Campos de rotação e deformação da viga de pinho bravo na condição encastrada-livre e solicitada na extremidade livre.

4.3 - Simulação numérica

Tendo como objectivo avaliar o desempenho do sistema desenvolvido procedeu-se à simulação numérica dos ensaios experimentais descritos neste capítulo. Para o efeito, recorreu-se a um programa comercial de elementos finitos, Ansys®.

Inicialmente, foi desenvolvido um modelo com a geometria e dimensões idênticas às do provete experimental utilizando o sistema de modelação tridimensional SolidWorks. O modelo foi exportado para o programa de elementos finitos onde foi gerada uma malha de elementos tetragonais (SOLID187). Este elemento é definido por dez nós, tendo três graus de liberdade por nó (translações nas direcções x, y e z), é usado para aplicações de análises tridimensionais e está bem adaptado para a criação de malhas em geometrias irregulares. Pode ser usado em aplicações onde ocorram elevadas deformações, em regime elástico e plástico [8].

Na simulação numérica desenvolvida neste trabalho consideram-se as seguintes condições de fronteira para a viga: numa das extremidades utilizou-se um encastramento e a outra ficou livre, nesta, foi aplicado um deslocamento linear na direcção perpendicular ao plano de medição. Na figura 4.13 podem observar-se as condições de fronteira da simulação realizada, recorrendo ao método dos elementos finitos obtida na simulação da viga.

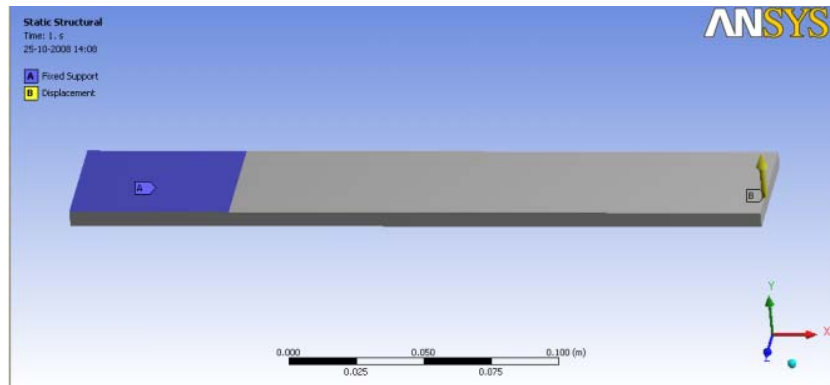


Figura 4.13 - Representação das condições fronteira aplicadas.

Para avaliar a evolução das deformações ao longo da mediatriz localizada na face superior da viga, entre o encastramento e a região da aplicação do deslocamento, recorreu-se a uma função de pós-processamento existente no Ansys, denominada “*Path Operations*” e que permite escolher um caminho ao longo do qual é possível analisar a evolução dos resultados obtidos na simulação.

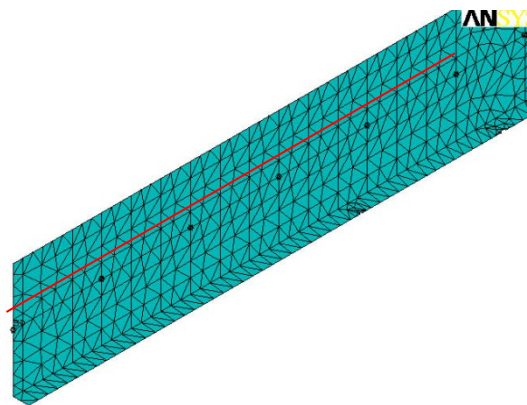


Figura 4.14 - Caminho escolhido para análise da evolução das deformações no plano, na direcção x.

4.3.2 - Viga em alumínio

Para esta viga consideram-se as seguintes propriedades mecânicas para a liga de alumínio utilizada:

- Módulo de Elasticidade = 70 [GPa]
- Coeficiente de Poisson = 0.33

Foi gerada uma malha de 3711 elementos. As condições de fronteira foram definidas anteriormente com aplicação de um deslocamento no bordo livre de $7.0E-05$ [m].

Após o processamento fez-se uma análise dos resultados obtidos, na figura 4.15 pode observar-se o campo de deformações no plano, direcção x, das coordenadas cartesianas globais definidas por defeito no Ansys.

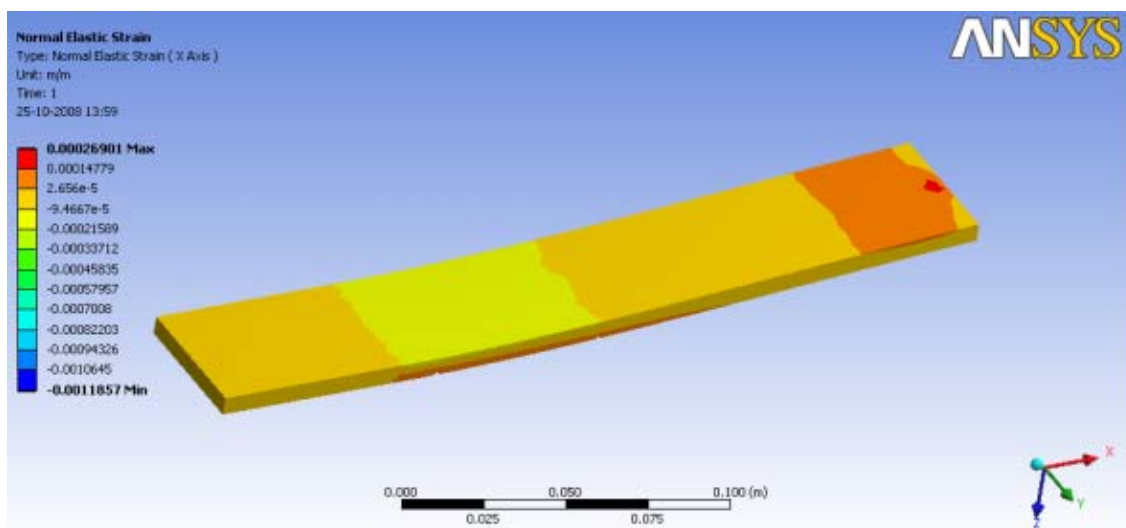


Figura 4.15 - Representação do campo de deformações determinado numericamente.

Na figura 4.14, pode observar-se a variação do campo de deformações provocado pelo deslocamento aplicado, pode afirmar-se, analisando a distribuição das isocurvas na superfície da viga, que a deformação ocorrida é iminentemente linear, as regiões onde ocorre uma variação desse comportamento é

O estudo da evolução das deformações ao longo da mediatriz indicada na figura 4.16 pode ser vista na figura seguinte.

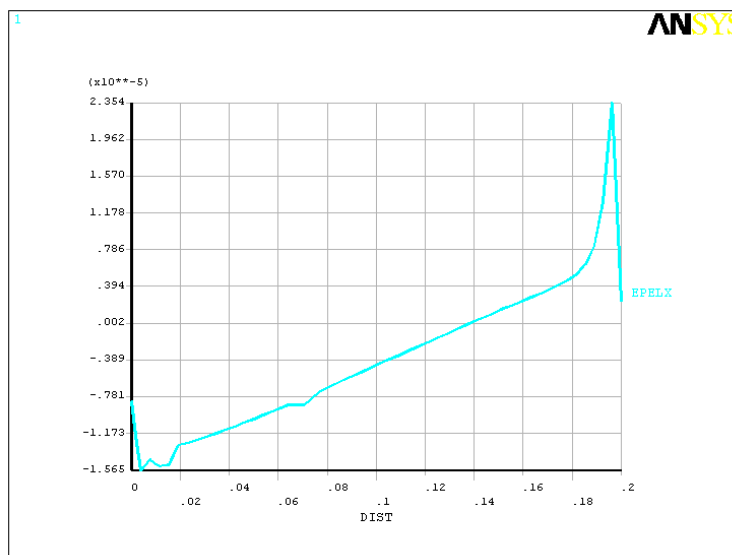


Figura 4.16 - Evolução da deformação em x mediatriz da face superior da viga.

A análise das figuras anteriores revela que na zona do encastramento a deformação é nula. Na proximidade da extremidade livre e da região do encastramento da viga verifica-se o efeito de bordo, que está patente na alteração abrupta do comportamento linear da deformação. Na extremidade livre também se verifica o efeito da aplicação do deslocamento concentrado numa secção muito pequena. Estes efeitos seriam

negligenciáveis se fosse utilizada uma viga com muito maiores dimensões, onde fosse possível aplicar o princípio de Saint Venant.

4.3.2 - Viga em madeira

As propriedades mecânicas da madeira de pinho bravo utilizadas estão indicadas na tabela 4.1 e tem uma densidade de $340 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$, as direcções de ortotropia coincidem com as do sistema de coordenadas cartesianas globais definidas por defeito no código de elementos finitos utilizado. É de referir que nesta simulação utilizou-se o módulo de elasticidade, na direcção longitudinal determinado experimentalmente, no ensaio de tracção.

Tabela 4.1 - Propriedades da madeira [4].

E_x [GPa]	E_y [GPa]	E_z [GPa]	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{xz}	G_{xy} [GPa]	G_{yz} [GPa]	G_{xz} [GPa]
5,4	1,912	1,010	0,568	0,051	0,471	0,171	1,042	1,115

Foi gerada uma malha de 2702 elementos. As condições de fronteira e de solicitação são análogas ao do ensaio experimental.

Após o processamento fez-se uma análise dos resultados obtidos, na figura 4.17 pode observar-se o campo de deformações no plano, direcção x, das coordenadas definidas no Ansys.

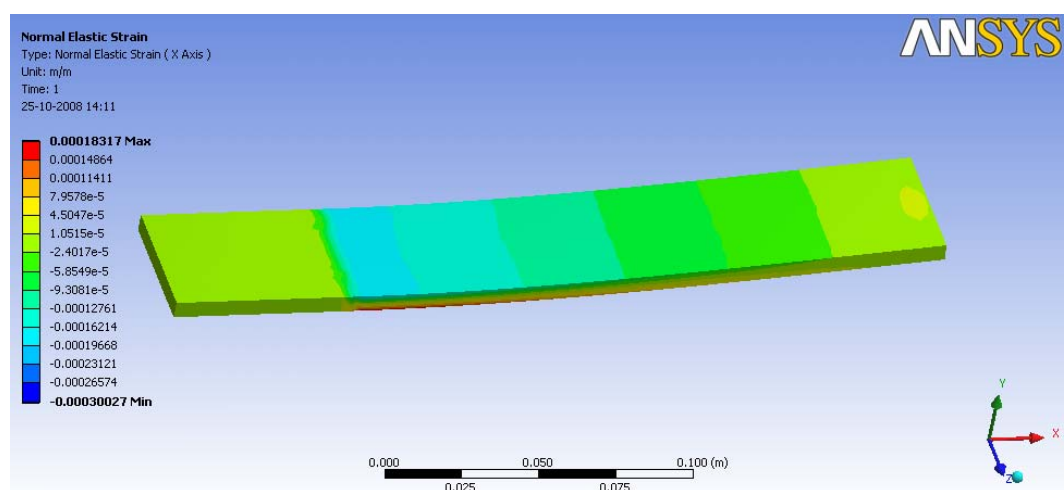


Figura 4.17 - Representação das condições de fronteira e a deformação na viga.

O estudo da evolução das deformações ao longo da mediatriz indicada na figura 4.14 pode ser vista na figura seguinte.

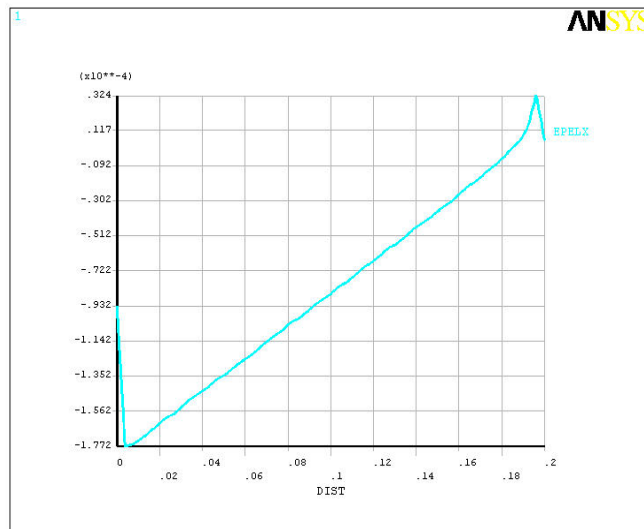


Figura 4.18 - Evolução da deformação em x ao longo da mediatriz da viga.

A deformação ao longo da viga tem uma representação quase rectilínea, nas situações que difere é apenas junto ao encastramento e na extremidade livre, onde o deslocamento é aplicado.

4.4 - Comparação de resultados

Alumínio

Na figura 4.19 comparam-se os perfis ao longo da mediatriz do campo de rotações obtidos por via experimentalmente (Exp.) e pelo método dos elementos finitos (MEF).

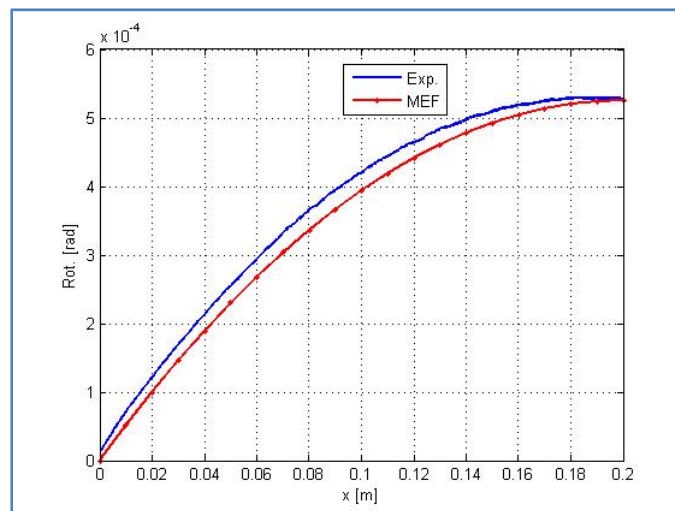


Figura 4.19 - Comparação entre os valores da rotação no plano, obtidos numericamente e medidos experimentalmente com sistema *Shear* para a viga em alumínio.

Analisando o gráfico da figura 4.19, para a viga de alumínio, verifica-se que o valor máximo de rotação é praticamente o mesmo quer usando o método numérico quer usando o método experimental. O andamento da rotação no plano ao longo do eixo central no plano superior da viga (figura 4.16) é muito semelhante embora com uma curvatura ligeiramente superior da obtida pelo método do sistema *Shear*. Na zona inicial verifica-se que o sistema *Shear* inicia-se ligeiramente acima de 0 (zero), isso devido ao facto de o encastramento da viga de alumínio no ensaio experimental não ter sido o mais adequado.

Na figura 4.20 podem observar-se os perfis ao longo da mediatriz do campo de rotações obtidos por via experimentalmente (Exp.) e pelo método dos elementos finitos (MEF).

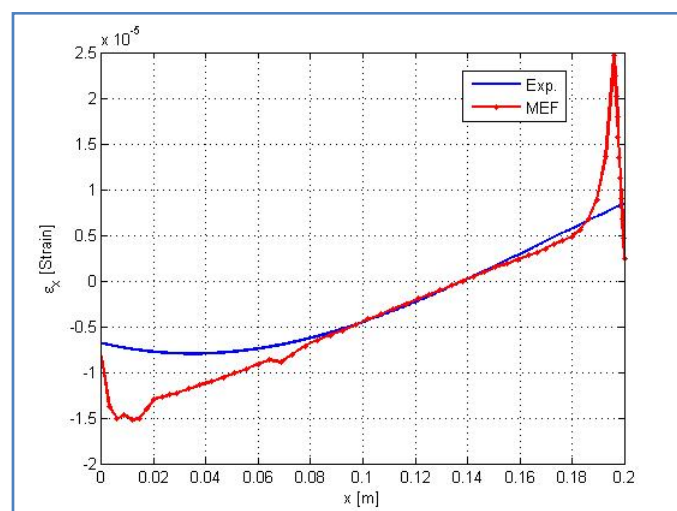


Figura 4.20 - Comparação entre os valores da deformação obtidos numericamente e medidos experimentalmente com sistema *Shear* para a viga em alumínio.

Comparando os resultados obtidos com os dois métodos (experimental e numérico), pode verificar-se que na zona do encastramento os resultados do sistema *Shear* diferem da recta linear obtida com o método dos elementos finitos. Esta diferença deve-se, provavelmente ao incorrecto encastramento utilizado no ensaio experimental, como a viga ensaiada tem uma espessura relativamente elevada dificulta o seu encastramento de forma correcta tornando-o pouco rígido. Na zona da aplicação do deslocamento, nota-se também o efeito da aplicação do deslocamento numa região concentrada, este efeito poderia ser menos acentuado se o deslocamento aplicado na simulação numérica tivesse sido mais distribuído.

Madeira

O resultado obtido pelos diferentes métodos na madeira é muito semelhante, na figura 4.21 estão representados graficamente os dois resultados separados da deformação da viga de madeira.

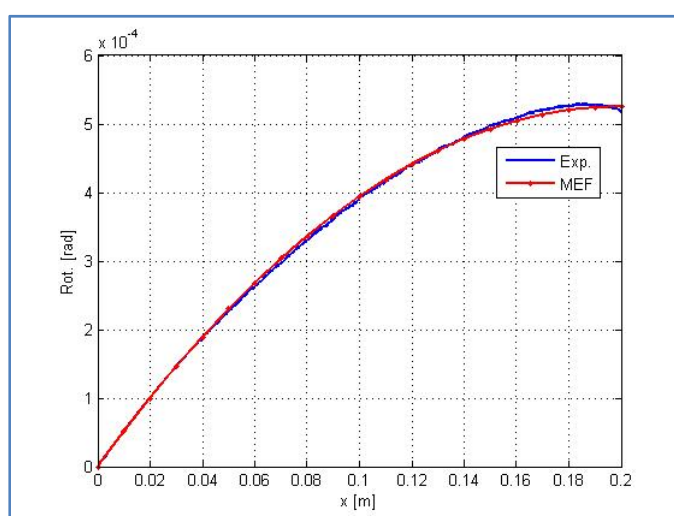


Figura 4.21 - Comparação entre os valores da rotação no plano, obtidos numericamente e medidos experimentalmente com sistema *Shear* para a viga em madeira.

Comparando os resultados alcançados com as duas metodologias, numérica e experimental, pode verificar-se que o comportamento do andamento da rotação, ao longo da mediatriz da viga, é praticamente coincidente. Ocorrendo uma variação ligeiramente mais pronunciada na proximidade da região da aplicação do deslocamento.

Na figura 4.22, estão representados os perfis ao longo da mediatriz do campo de rotações obtidos por via experimentalmente e pelo método dos elementos finitos.

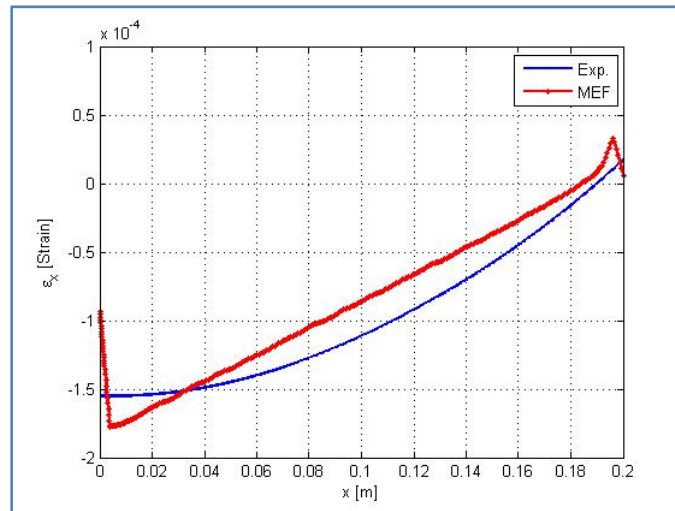


Figura 4.22 - Comparação entre os valores da deformação obtidos numericamente e medidos experimentalmente com sistema *Shear* para a viga em madeira.

Comparando os resultados alcançados com as duas metodologias, numérica e experimental, pode verificar-se um comportamento muito próximo do andamento das deformações. Podem-se observar algumas diferenças entre os resultados experimentais e as simulações numéricas, elas devem-se, fundamentalmente, a dois factores: a diferença entre as propriedades utilizadas na simulação numérica e as propriedades reais da madeira, que podem variar significativamente, dependendo de factores que não foram controlados neste trabalho, tais como a idade da árvore, a região do país em que esta foi abatida, a humidade e temperatura em que ocorreu o ensaio, etc.; a variação que ocorre nas extremidade encastrada e livre, devido à concentração de tensões e concentração de deslocamento, respectivamente.

4.5 - Referências

1. Lopes, Hernani. *Desenvolvimento de Técnicas Interferométricas, Contínuas e Pulsadas, Aplicadas à Análise do Dano em Estruturas Compósitas*. Tese de Doutoramento, Porto : FEUP, 2007.
2. Volkov, V.V. and Y.M. Zhu, *Deterministic phase unwrapping in the presence of noise*. *Optics Letters*, 2003. 28(22): p. 2156-2158.
3. Monteiro, Morais, J.L., Xavier, J.C., *Mechanical behaviour of wood in the orthotropic directions*: Vila Real, UTAD 1998
4. Pereira, João Luís Esteves. *Comportamento mecânico da madeira*, tese de doutoramento, Vila Real : UTAD, 2005.
5. Chousal, José A. G. *Técnicas de Processamento de imagem obtidas por métodos ópticos em análise experimental de tensões* . Porto : FEUP, 1999.
6. Kreis, T. *Handbook of holographic interferometry : optical and digital methods* . s.l. : Wiley-VCH, 2005.
7. Pritt, D.C. Ghiglia and M.D. *Two-dimensional phase unwrapping : theory, algorithms and software*. New York : Wiley, 1998.
8. Zienkiewicz, O. C. *The Finite Element Method in Engineering Science* . New York : McGraw-Hill, 1971.
9. J.Blom, B.M.T.H.Romeny, A.Bel, and J.J.Koenderink. *Spatial derivatives and the propagation of noise in gaussian scale space*. Visual Communication and image representation, 1993.
10. Timoshenko, S. and S. Woinowsky-Krieger,. *Theory of plates and shells*. New York : McGraw-Hill, 1959.
11. Monteiro, Jaime. *Desenvolvimento de um sistema de interferometria Holográfica (ESPI) para a análise de estruturas sob solcitações estáticas e dinâmicas* : Porto, FEUP 1998.

5 - Conclusões e sugestões para futuro desenvolvimento

5.1 - Nota final

Alguns grupos de investigação em Portugal, nomeadamente o Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental (LOME), possuem uma larga experiência na medição de campos de deslocamentos e rotações fora-do-plano com técnicas ópticas da Mecânica Experimental como: interferometria holográfica, ESPI e Shearography. Para a caracterização global do comportamento mecânico dos materiais é necessário conhecer os campos de deslocamento e deformação no plano. Até há pouco tempo, as deformações eram parcialmente medidas através da utilização da extensometria eléctrica. As medições de deformações no plano são necessárias para a caracterização estado de tensão em várias aplicações, tais como, na mecânica da fractura, na medição de tensões residuais, em ensaios de tracção e flexão, entre outros. Estas podem ser realizadas com recurso a técnicas de imagem como: o Moiré geométrico e interferométrico, a correlação de imagem, o ESPI e a *Shearography* no plano. Sendo esta última, a única que permite a medição directa das deformações, todas outras necessitam de recorrer à diferenciação numérica, com todos os problemas relacionados com a ampliação do ruído que lhe estão associados. Assim, neste trabalho projectou-se um sistema *Shear* para a medição de campos de deformações no plano, com elevada resolução. O sistema foi desenvolvido com base num modelo estabelecido, o qual engloba toda a experiência adquirida pelo grupo LOME.

A elevada resolução da medição do sistema *Shear* obrigou à utilização de apertados toleranciamentos geométricos e dimensionais, na maquinaria de todas as suas peças. As ferramentas CAD/CAM utilizadas demonstraram uma elevada eficiência e flexibilidade quando aplicadas a processos de fabrico de protótipos. Estas ferramentas foram um elemento importante na realização deste trabalho, pois permitem uma rápida alteração e fabrico dos componentes desenvolvidos. A partir da modelação tridimensional dos elementos do sistema *Shear* foi possível fazer-se a sua montagem em CAD e verificar zonas de interferência, análise e estudo de distâncias focais, posicionamento dos componentes ópticos. Com o software CAM foi possível realizar simulações de maquinaria, podendo analisar-se e escolher-se as sequências de maquinaria mais adequadas para a obtenção de peças com tolerâncias muito apertadas, necessárias para a obtenção de um sistema metrológico.

Fizeram-se algumas medições. Implementou-se um ensaio numa viga encastrada-livre, onde foi imposto um deslocamento na sua extremidade livre. Foram utilizadas vigas de dois materiais com características mecânicas diferentes: isotrópico (liga de alumínio) e ortotrópico (madeira de pinho). Mediram-se os campos de deformações no plano e de rotações para as duas vigas, com o sistema *Shear* desenvolvido neste trabalho. Os

resultados obtidos foram comparados aos determinados numericamente pelo método dos elementos finitos. Por comparação, verificou-se que há uma boa concordância entre os resultados obtidos pelas duas vias, principalmente no ensaio com a viga de madeira. O seu melhor comportamento junto ao encastramento é justificado pela maior diferença de rigidez entre a viga de madeira e o maciço em Aço.

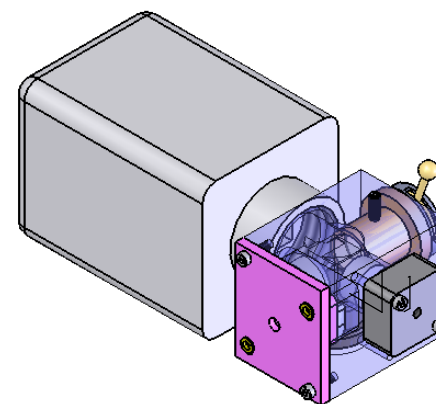
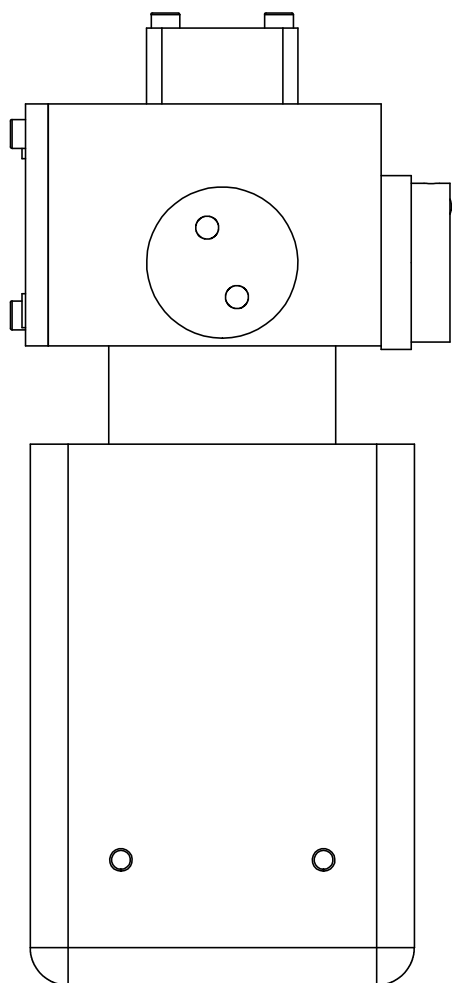
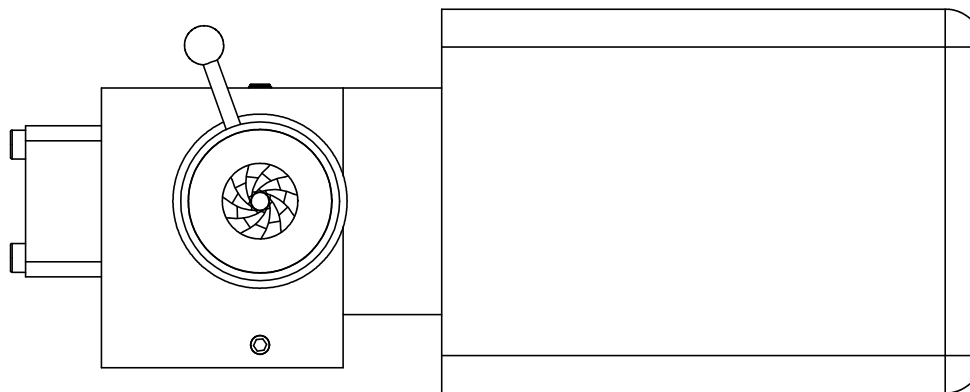
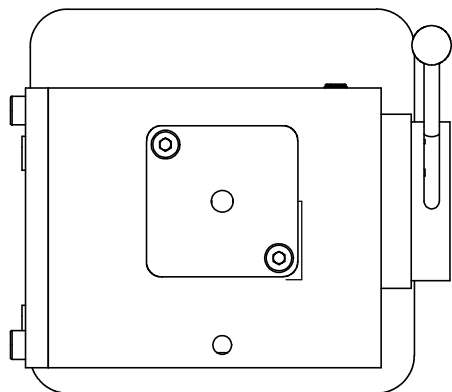
Da análise dos resultados obtidos pode concluir-se que esta técnica está bem adaptada para a medição das deformações no plano, alcançando-se resultados com elevada precisão e resolução.

5.2 - Proposta de trabalhos futuros

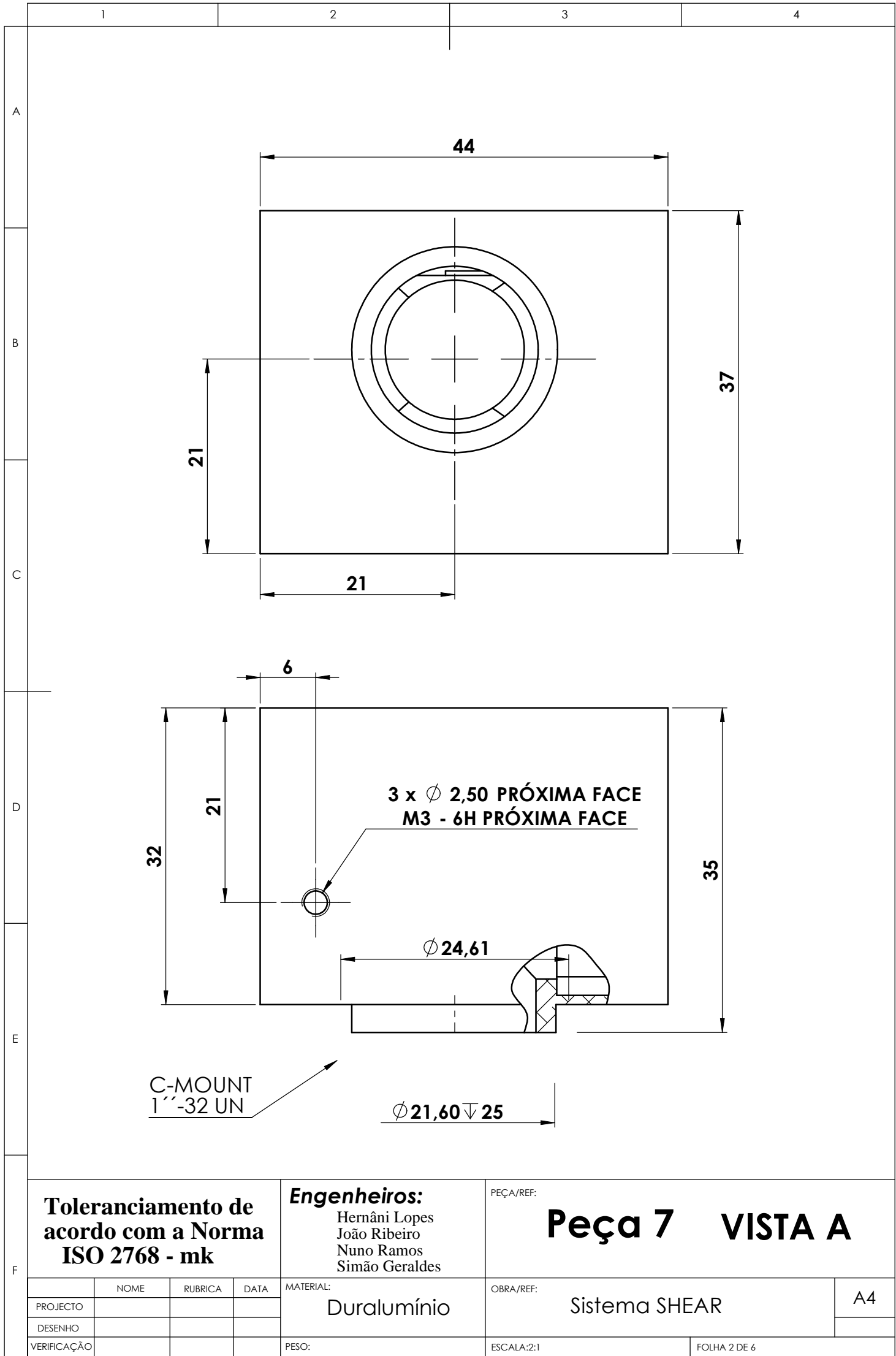
O sistema construído foi projectado de forma modular e tendo em vista os seus melhoramentos futuros, nomeadamente: na calibração do *Shear* nos eixos X e Y de uma forma automática e controlada pelo computador. Desta forma permitiria a medição rápida nas duas direcções ortogonais sem intervenção humana.

É também de salientar, que para além das medições efectuadas em dois materiais diferentes, devem realizar-se testes com outros materiais e em diferentes domínios de aplicação, podendo explorar o desempenho desta técnica na detecção do dano e defeitos fabrico em materiais compósitos.

Anexo A – Desenhos de definição do sistema *Shear*



ENGENHEIROS: Hernâni Lopes João Ribeiro Nuno Ramos Simão Geraldes		Nome	Data	Sistema SHEAR Montagem	
	Desenhou			Sistema SHEAR	
	Projecto				
	Verificação				
MATERIAL				SIZE A	DWG. NO.
				SCALE 1:2	REV.
				Folha 1 de 1	



SECTION A-A

VISTA B

Toleranciamento de acordo com a Norma ISO 2768 - mk

	NOME	RUBRICA	DATA
PROJECTO			
DESENHO			
VERIFICAÇÃO			

Engenheiros:
Hernâni Lopes
João Ribeiro
Nuno Ramos
Simão Gerales

MATERIAL:
Duralumínio

PESO:

PEÇA/REF:

Peça 7 VISTA B

OBRA/REF:

Sistema SHEAR

A4

FOLHA 3 DE 6

2 x M3 PRÓXIMA FACE

Technical drawing of a square plate with a central circular hole and four corner holes. The drawing includes dimensions: overall width 32, overall height 31, central hole diameter 17, corner hole diameter 2.50, and various radii (R7, R2). A 45-degree chamfer is shown on one side. A section line A-A is indicated.

Dimensions and features:

- Overall width: 32
- Overall height: 31
- Central hole diameter: $\phi 17$
- Corner hole diameter: $4 \times \phi 2,50 \nabla 6$
- Corner hole thread: $M3 - 6H \nabla 5$
- Top-left corner radius: R7
- Inner corner radius: R2
- Chamfer angle: 45°
- Section line A-A

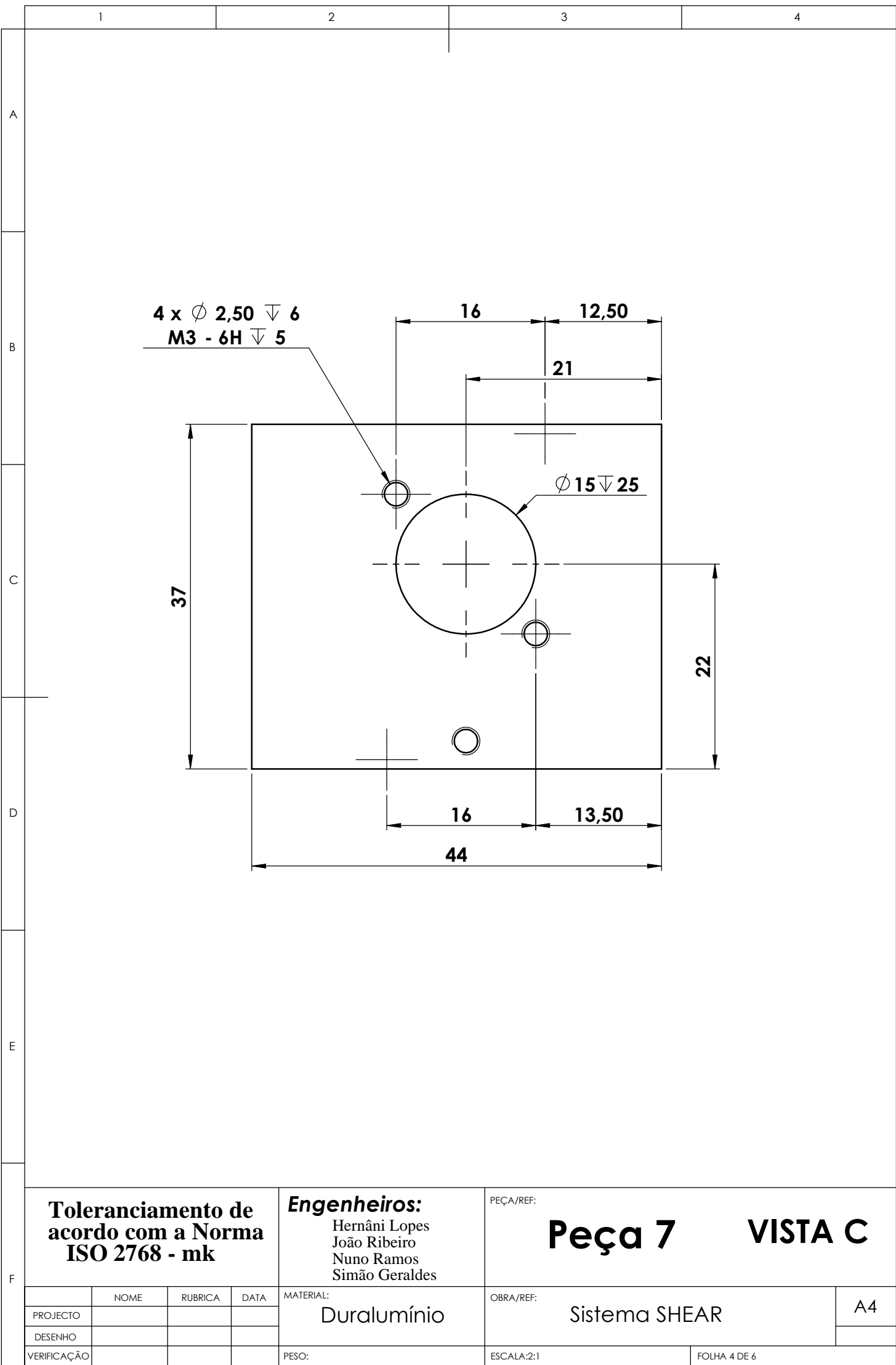
**Toleranciamento de
acordo com a Norma
ISO 2768 - mk**

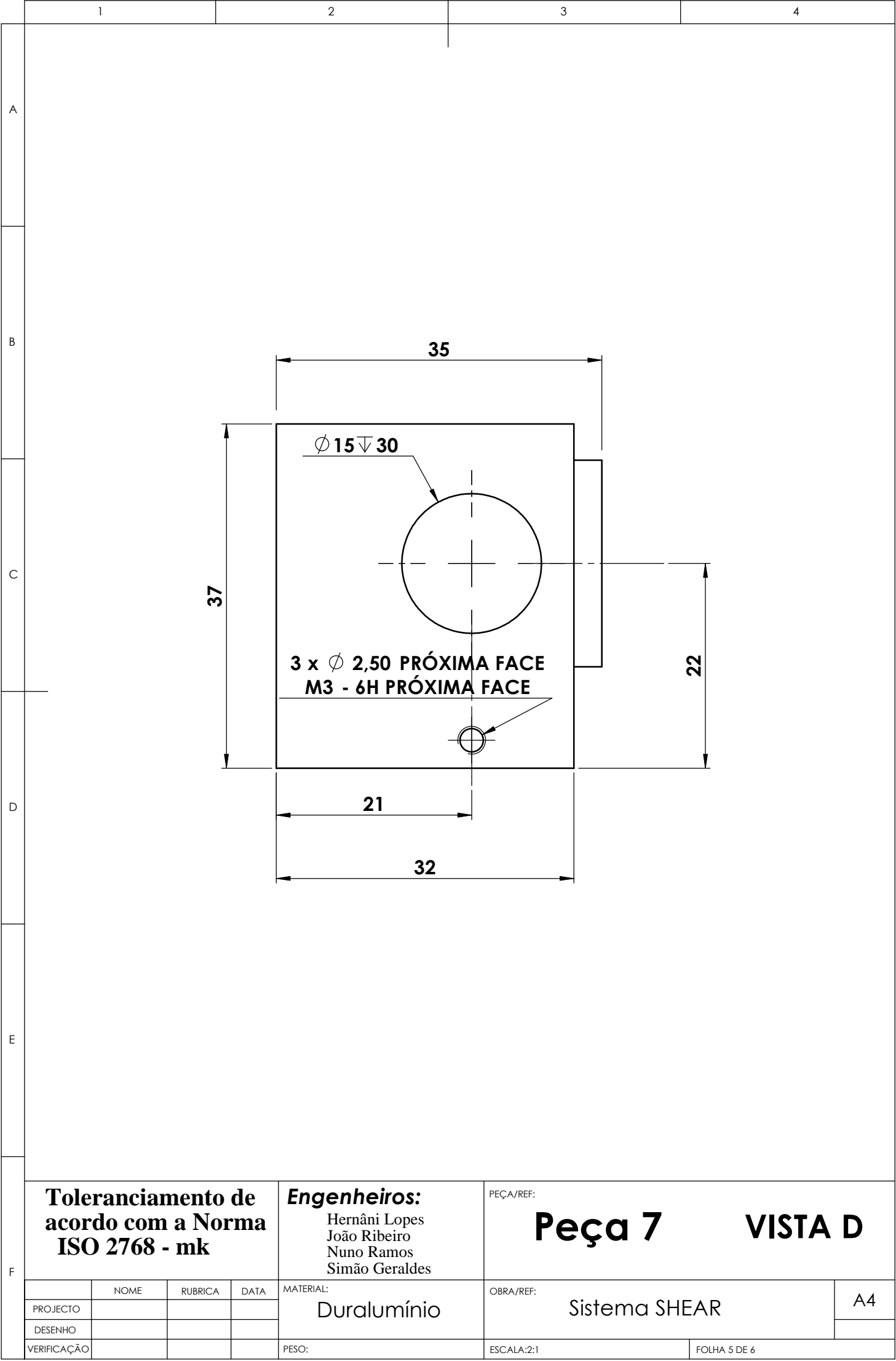
Engenheiros:
Hernâni Lopes
João Ribeiro
Nuno Ramos
Simão Geraldes

PEÇA/REF:

Peça 7 VISTA B

	NOME	RUBRICA	DATA	MATERIAL: Duralumínio	OBRA/REF: Sistema SHEAR		A4
PROJECTO							
DESENHO							
VERIFICAÇÃO				PESO:	ESCALA:2:1	FOLHA 3 DE 6	





Toleranciamento de acordo com a Norma ISO 2768 - mk

Engenheiros:
Hernâni Lopes
João Ribeiro
Nuno Ramos
Simão Gerales

PEÇA/REF:

Peça 7 VISTA D

	NOME	RUBRICA	DATA
PROJECTO			
DESENHO			
VERIFICAÇÃO			

MATERIAL:

Duralumínio

OBRA/REF:

Sistema SHEAR

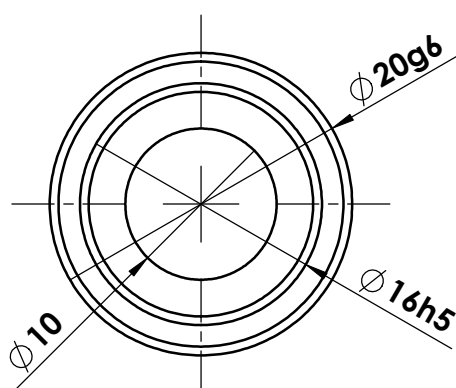
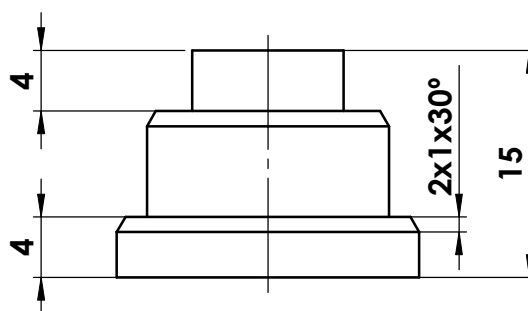
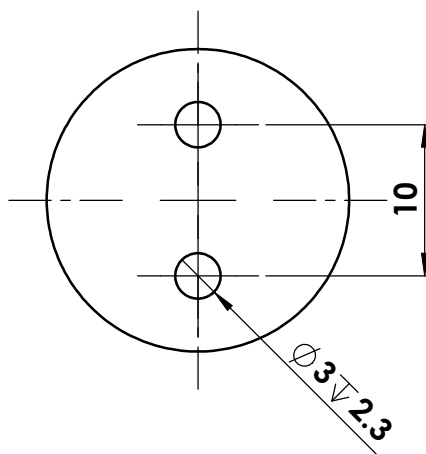
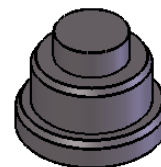
A4

PESO:

ESCALA:2:1

FOLHA 5 DE 6

B



Dimensões Globais:
Ø 20x15

**Toleranciamento de
acordo com a Norma
ISO 2768 - mk**

Engenheiros:
Hernâni Lopes
João Ribeiro
Nuno Ramos
Simão Gerales

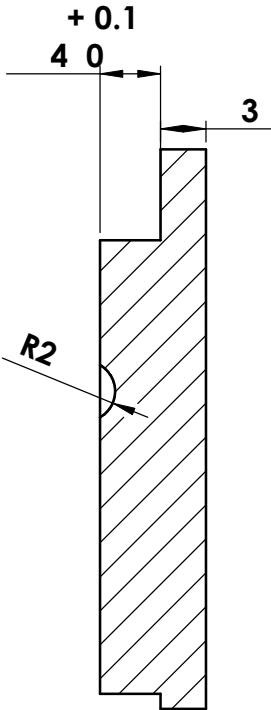
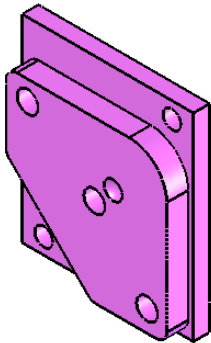
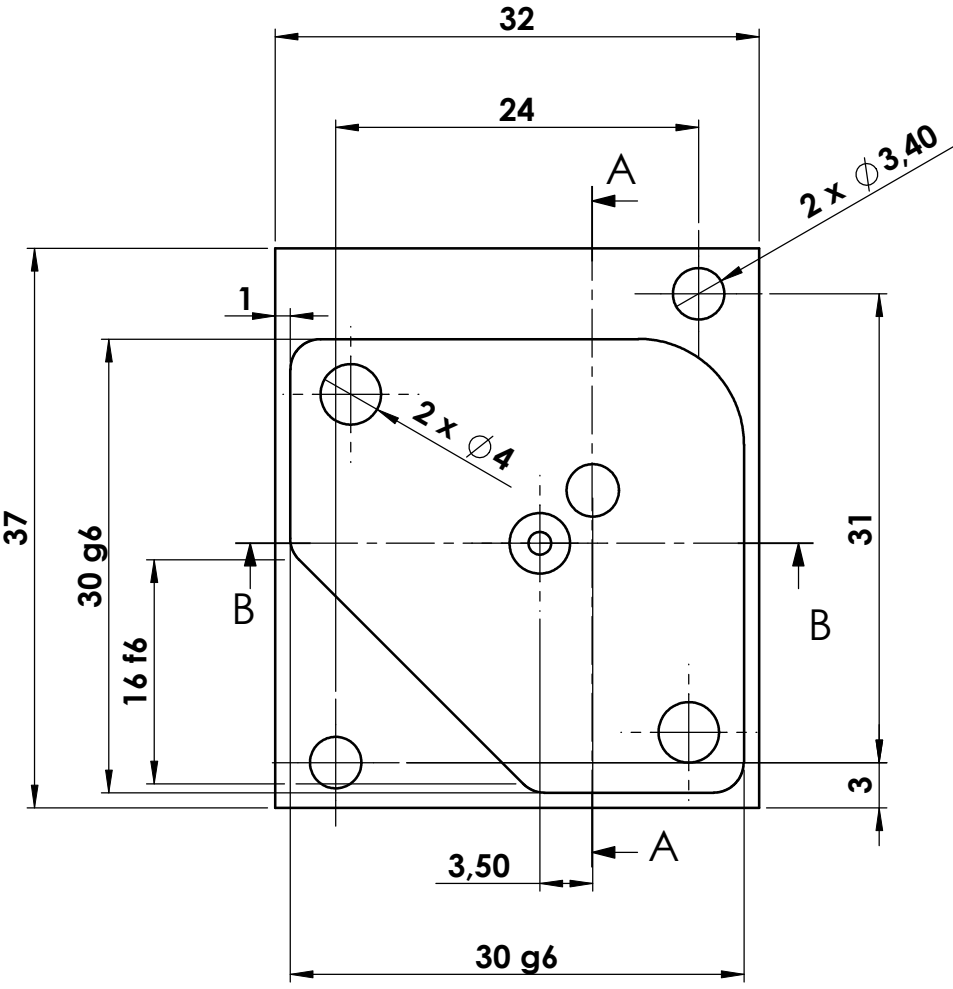
PEÇA/REF:

Peça 1

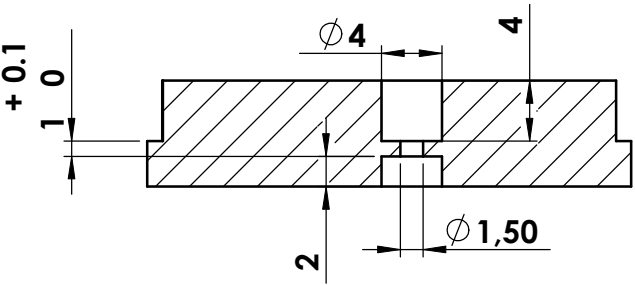
F

	NOME	RUBRICA	DATA	MATERIAL: Duralumínio	OBRA/REF: Sistema SHEAR	A4
PROJECTO						
DESENHO						
VERIFICAÇÃO				PESO:	ESCALA 2:1	FOLHA 1 DE 1

A
B
C
D
E
F



CORTE A-A



CORTE B-B

Dimensões Globais:
39x32x7

Toleranciamento de
acordo com a Norma
ISO 2768 - mk

Engenheiros:
Hernâni Lopes
João Ribeiro
Nuno Ramos
Simão Gerales

PEÇA/REF:
Peça 3

	NOME	RUBRICA	DATA	MATERIAL:	OBRA/REF:	A4
PROJECTO				Duralumínio	Sistema SHEAR	
DESENHO						
VERIFICAÇÃO				PESO:	ESCALA 2:1	FOLHA 1 DE 1

1

2

3

4

A

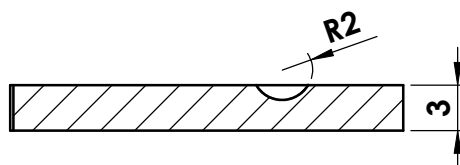
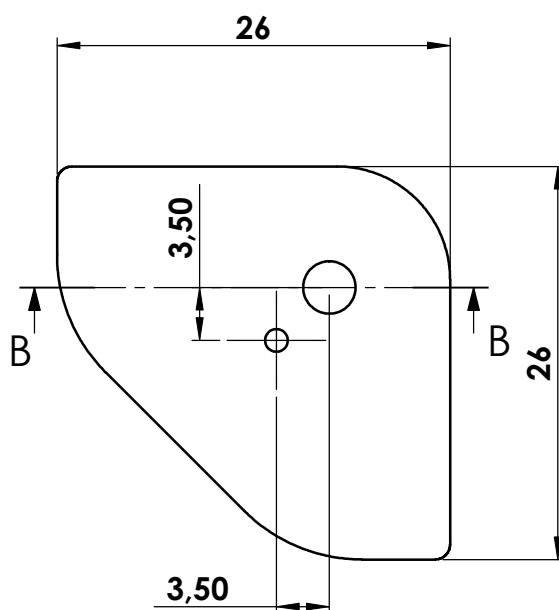
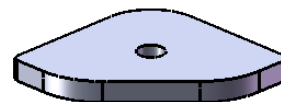
B

C

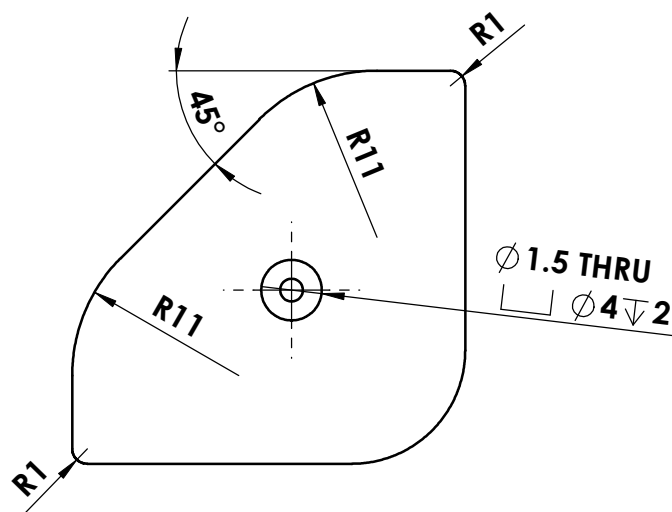
D

E

F



CORTE B-B



Dimensões Globais:
26x26x3

**Toleranciamento de
acordo com a Norma
ISO 2768 - mk**

Engenheiros:

Hernâni Lopes
João Ribeiro
Nuno Ramos
Simão Gerales

PEÇA/REF:

Peça 2

	NOME	RUBRICA	DATA
PROJECTO			
DESENHO			
VERIFICAÇÃO			

MATERIAL:
Duralumínio

PESO:

OBRA/REF:

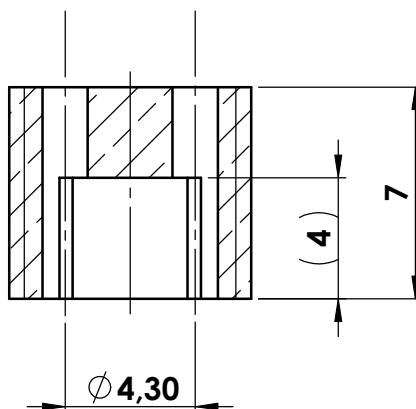
Sistema SHEAR

A4

ESCALA 2:1

FOLHA 1 DE 1

E



Dimensões Globais: $\varnothing 8 \times 14$

Peça 8

	NOME	RUBRICA	DATA	MATERIAL: Duralumínio	OBRA/REF: Sistema SHEAR		A4
PROJECTO							
DESENHO							
VERIFICAÇÃO				PESO:	ESCALA 4:1	FOLHA 1 DE 1	

A

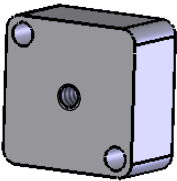
B

C

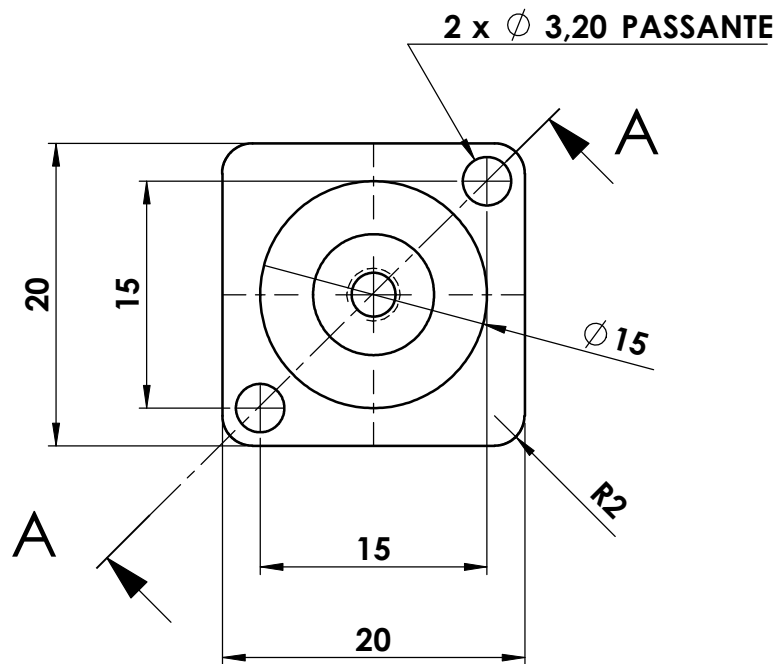
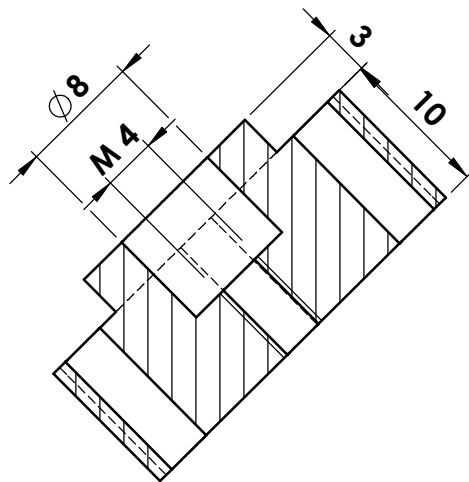
D

E

F



CORTE A-A
ESCALA 2 : 1



Dimensões Globais:
20x20x6

**Toleranciamento de
acordo com a Norma
ISO 2768 - mk**

Engenheiros:
Hernâni Lopes
João Ribeiro
Nuno Ramos
Simão Geraldes

PEÇA/REF:

Peça 4

	NOME	RUBRICA	DATA
PROJECTO			
DESENHO			
VERIFICAÇÃO			

MATERIAL:

Duralumínio

OBRA/REF:

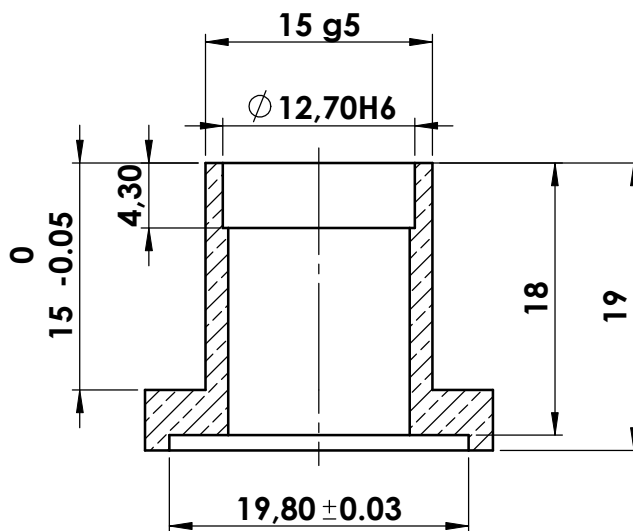
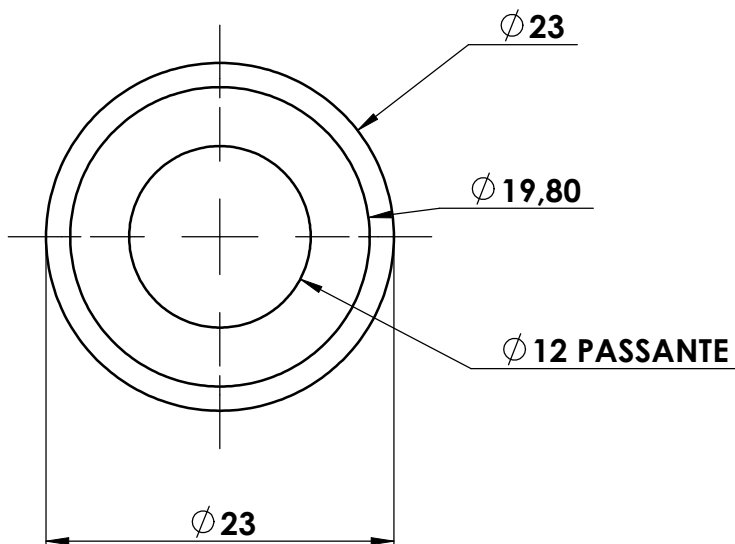
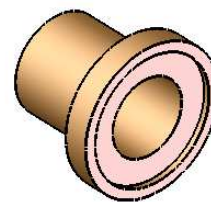
Sistema SHEAR

A4

PESO:

ESCALA 2:1

FOLHA 1 DE 1



Dimensões Globais:
 $\phi 23 \times 19$

Toleranciamentode
acordo com a Norma
ISO 2768 - mk

Engenheiros:

Hernâni Lopes
João Ribeiro
Nuno Ramos
Simão Gerales

PEÇA/REF:

Peça 5

	NOME	RUBRICA	DATA
PROJECTO			
DESENHO			
VERIFICAÇÃO			

MATERIAL:

Duralumínio

OBRA/REF:

Sistema SHEAR

A4

PESO:

ESCALA:2:1

FOLHA 1 DE 1

Anexo B – Folha de Inspeção

FOLHA DE INSPECÇÃO

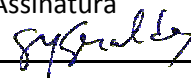
Designação: Tese de Mestrado
 Desenho: Sistema Shear

Cota Nº	Especificação		Peça	Medições			Media	Controlo
1	37	$\pm 0,15$	P7_R	37.11	37.1	37.09	37.10	OK
2	44	$\pm 0,15$		44.11	44.11	44.1	44.11	OK
3	$\varnothing 15H6$	$+ 0,11$ 0		15	15.05	15	15.02	OK
4	35	$\pm 0,15$	P7_r2	35	35.09	35.14	35.08	
5	$\varnothing 15H6$	$+ 0,11$ 0	P7_32	15	15.05	15	15.02	OK
6	$\varnothing 20H7$	$+ 0,21$ 0	P7_16	20	20	19.9	19.97	OK
7	20	$\pm 0,15$	20_20_14	20.13	20.14	20.09	20.12	OK
8	$\varnothing 15$	$\pm 0,15$		15.03	15.04	15.02	15.03	OK
9	6	$\pm 0,05$		6.1	6	6	6.03	OK
10	$\varnothing 8$	$\pm 0,05$		8.05	8	8	8.02	OK
11	30H7	$+ 0,25$ 0	P7_p3	30.1	30.14	30.09	30.11	OK
12								
13	$\varnothing 16h5$	0 $-0,11$	Peça 1	15.99	16	15.97	15.99	OK
14	$\varnothing 20g6$	$-0,07$ $-0,11$		19.95	19.96	19.9	19.94	OK
15	26	$\pm 0,1$	Peça 2	26	25.9	26	25.97	OK
16	16f6	$-0,16$ $-0,27$	Peça 3	15.85	15.8	15.8	15.82	OK
17	30g6	$-0,09$ $-0,25$		29.9	29.85	29.8	29.85	OK
18	4	$+ 0,10$ 0		4	4.05	4	4.02	OK
19	1	$+ 0,10$ 0		1	1.1	1.05	1.05	OK
20	19.8	$\pm 0,03$	Peça 5	19.8	19.88	19.8	19.83	OK
21	15	0 $-0,05$		15	14.98	15	14.99	OK
22	15g5	$-0,06$ $-0,14$		15	14.9	14.9	14.93	OK
23	12,7H6	$+ 0,11$ 0		12.75	12.7	12.75	12.73	OK

As tolerâncias adoptadas, para as dimensões lineares não toleranciadas no desenho, estão de acordo com a norma ISO 2768 e NP 265 (grau de precisão médio)

Data

Assinatura



Anexo C - Procedimentos de maquinagem

A maquinagem de todas as peças que constituem o sistema *Shear*, foi executada de uma forma cuidada e rigorosa, repetiu-se a maquinagens de algumas peças para alcançar um melhor resultado final. Apesar das ferramentas utilizadas não terem sido as mais adequadas para a maquinagem de ligas de alumínio, os resultados conseguidos na maquinagem foram satisfatórios.

Peça 1

A execução da peça 1 foi elaborada da seguinte forma:

- Preparação inicial de um bloco de alumínio e sua fixação na centro de maquinagem CNC,
- Programação da máquina, executando-se operações de desbaste e acabamento em todas as superfícies de deslizamento da peça. O acabamento foi realizado recorrendo a fresas de acabamento recta.
- A parte inferior da peça foi posteriormente maquinada no torno convencional

Na figura C1 está representada a peça com as simulações aqui descritas.

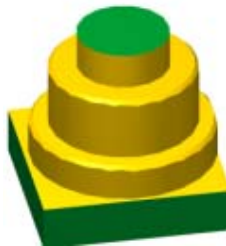


Figura C1 – Maquinagem da peça 1.

O tempo de programação foi de 5 minutos, o tempo de preparação da máquina foi de 4 minutos e a maquinagem foi realizada em 9 minutos.

Peça 2

A execução da peça 2 foi realizada da seguinte forma:

- Preparação inicial de um bloco de alumínio e sua fixação na centro de maquinagem CNC,
- Executou-se a furação com o recurso a uma broca helicoidal.

- Programou-se a máquina, executando-se operações de desbaste com uma fresa recta de desbaste e um acabamento em todas as superfícies com uma fresa recta de acabamento, sendo que, na superfície de ajuste da esfera procedeu-se ao acabamento com uma fresa boleada de acabamento.
- A parte inferior da peça foi posteriormente retirada da máquina CNC, com a execução de um novo programa. Usando para isso uma fresa de desbaste para retirar o restante material.

Na figura C2 está representada a peça com as simulações aqui descritas para a peça 2.

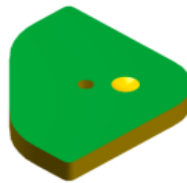


Figura C2 – Maquinagem da peça 2.

A programação foi feita em 7 minutos, a preparação da máquina durou 4 minutos e o tempo de maquinagem foi de 2 minutos.

Peça 3

A execução da peça 3 foi feita da seguinte forma:

- Preparação inicial de um bloco de alumínio e sua fixação na centro de maquinagem CNC,
- Programou-se a máquina, executando-se operações de desbaste com uma fresa recta de desbaste e um acabamento em todas as superfícies com uma fresa recta de acabamento,
- Recorreu-se a uma broca helicoidal para as furações,
- A parte inferior da peça foi posteriormente retirada na máquina CNC, com a execução de um novo programa. Usando para isso uma fresa de desbaste para retirar o restante material.

Na figura C3 apresenta-se a forma de operações de corte executadas na peça 3.

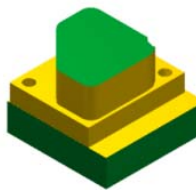


Figura C3 – Maquinagem da peça 3.

Os tempos de programação foram 10 minutos, o tempo de preparação da máquina foi de 6 minutos e o tempo de maquinagem foi de 27 minutos.

Peça 4

A execução da peça 3 foi realizada da seguinte forma:

- Preparação inicial de um bloco de alumínio e sua fixação na centro de maquinagem CNC,
- Programou-se a máquina executando-se operações de desbaste com uma fresa recta de desbaste e um acabamento em todas as superfícies com uma fresa recta de acabamento,
- Recorreu-se a uma broca helicoidal para a furação.
- Recorreu-se a machos para executar a rosca.
- A parte inferior da peça foi posteriormente retirada e colocada de novo na máquina CNC, com a execução de um novo programa. Usando para isso uma fresa de desbaste para retirar o restante material.

Na figura C4 apresenta-se a forma de operações de corte executadas na peça 4.

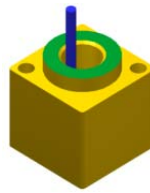


Figura C4 – Maquinagem da peça 4.

Elaborou-se a programação em 5 minutos, a preparação da máquina foi realizada em 4 minutos e a maquinagem executou-se em 9 minutos.

Peça 5

A execução da peça 3 foi realizada da seguinte forma:

- Preparação inicial de um bloco de alumínio e sua fixação na centro de maquinagem CNC,
- Programou-se a máquina executando-se operações de desbaste com uma fresa recta de desbaste e um acabamento em todas as superfícies com uma fresa recta de acabamento,
- Recorreu-se a uma broca helicoidal para a furação,
- A parte inferior da peça foi posteriormente retirada e executada no torno convencional.

Na figura C5 apresenta-se a forma de operações de corte executadas na peça 4.



Figura C5 – Maquinagem da peça 5.

Os tempos de programação foram 7 minutos, o tempo de preparação da máquina foi de 8 minutos e o tempo de maquinagem foi de 18 minutos.

Peça 7

A execução da peça 7 foi elaborada da seguinte forma:

- Preparação inicial de um bloco de alumínio e sua fixação na centro de maquinagem CNC,
- Programou-se a máquina executando-se operações de desbaste com uma fresa recta de desbaste e um acabamento em todas as superfícies com uma fresa recta de acabamento,
- Recorreu-se a uma broca helicoidal para a furação,
- Recorreu-se a machos para executar as roscas,
- Devido à complexidade desta peça foi necessária a execução de vários programas e de colocar a peça na máquina com as suas superfícies de maquinagem na direcção perpendicular ao eixo da árvore da máquina. Neste caso, foram maquinadas seis faces.

Na figura C6 apresenta-se a forma de operações de corte executadas na peça 7.

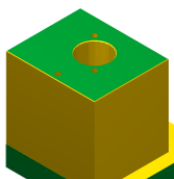


Figura C6 – Maquinagem da peça 7.

A programação foi implementada em 24 minutos, o tempo de preparação da máquina foi de 29 minutos e a maquinagem durou 69 minutos para ser realizada.

Peça 8

A execução da peça 8 foi feita da seguinte forma:

- Preparação inicial de um bloco de alumínio e sua fixação na centro de maquinagem CNC,
- Programou-se a máquina executando-se operações de desbaste com uma fresa recta de desbaste e um acabamento em todas as superfícies com uma fresa recta de acabamento,
- Recorreu-se a uma broca helicoidal para a furação.
- A parte inferior da peça foi posteriormente retirada e executada no torno convencional.

Na figura C7 apresenta-se a forma de operações de corte executadas na peça 8.



Figura C7 – Maquinagem da peça 8.

Os tempos de programação foram 5 minutos, o tempo de preparação da máquina foi de 4 minutos e o tempo de maquinagem foi de 3 minutos.

Anexo D - Ensaio de tracção da madeira

Na maioria dos casos de projecto de estruturas em madeira, é comum admitir que a madeira é um material contínuo, homogéneo e com um comportamento mecânico linear elástico. Além disso, é também usual tratar a madeira como um material ortotrópico, que em cada ponto admite três direcções de simetria material, mutuamente ortogonais: a direcção Longitudinal (L) do fio, a direcção Radial (R) dos raios lenhosos e a direcção Tangencial (T) aos anéis de crescimento (Figura D.1). Assim, à custa dessas três direcções de simetria da estrutura anatómica da madeira, é possível definir em cada ponto um sistema de coordenadas cartesiano e ortonormado, habitualmente designado por sistema LRT.

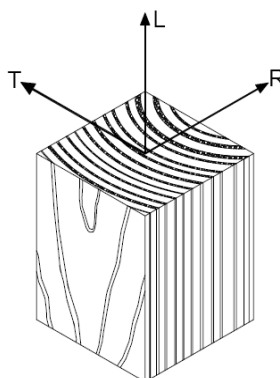


Figura D.1 – Direcções de simetria da madeira.

O provete de tracção na direcção longitudinal tem a forma paralelepipedica (figura D.2), com 200 mm de comprimento (na direcção longitudinal), 6 mm de espessura (na direcção tangencial) e 20 mm de largura (na direcção radial).

Nas extremidades do provete, na zona de aperto das amarras de tracção, foram usados reforços em compósito de fibra de vidro e resina de epoxido. Desta forma, aumentou-se a rigidez do provete na região da amarração, garantindo, com elevada probabilidade, romperia sensivelmente a meio. A amarra do provete tem 55 mm de comprimento e 2 mm de espessura, tal como se pode verificar na representação da geometria do provete, na figura D2.

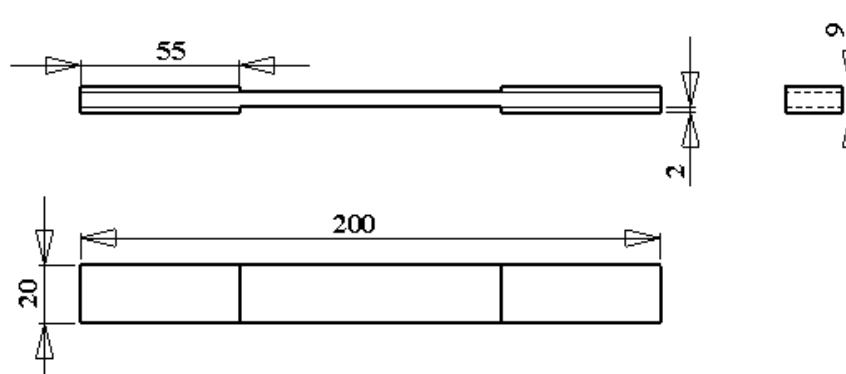


Figura D.2 – Geometria dos provetes de madeira.

Na figura D.3 está uma ilustração do processo de preparação dos provetes para os ensaios de tracção.

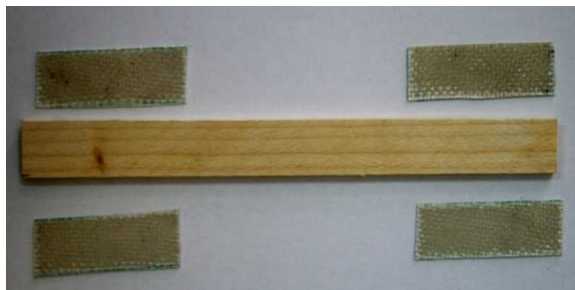


Figura D.3 – Preparação dos provetes de madeira para ensaios de tracção.

Existem diversas normas que contemplam um ensaio de tracção para a determinação do módulo de elasticidade Longitudinal (*EL*) e da resistência à tracção Longitudinal (*XL*) da chamada madeira limpa, isto é, da madeira com o fio direito, sem nós ou outros defeitos. Contudo, nenhuma norma prevê a identificação do coeficiente de Poisson ν_{xz} .

Todas as normas preconizam um procedimento semelhante para a identificação das propriedades mecânicas, a partir dos resultados experimentais directamente medidos no decorrer dos ensaios. Basicamente, o módulo de elasticidade Longitudinal (*EL*) é determinado a partir da seguinte equação:

$$E = \frac{F}{A\epsilon} \quad \text{Equação 4.3}$$

onde *A* é a área da secção resistente do provete, *F* é a força registada pela célula de carga e ϵ é a deformação medida com um transdutor de deslocamentos. Fazendo os cálculos à média dos 3 provetes que se consideraram válidos concluiu-se que o modulo de elasticidade da madeira em causa é de 5,4 [GPa].



Figura D.4 – Provates de madeira ensaiados.

Alguns provates partiram pela zona das amarras, como se pode ver na figura D.4, esses resultados foram considerados não válidos e apenas se consideraram válidos os resultados dos provates designados por e_1 , e_3 e e_6 , na figura D.5 está a curva de Tensão/Deformação dos 3 provates válidos.

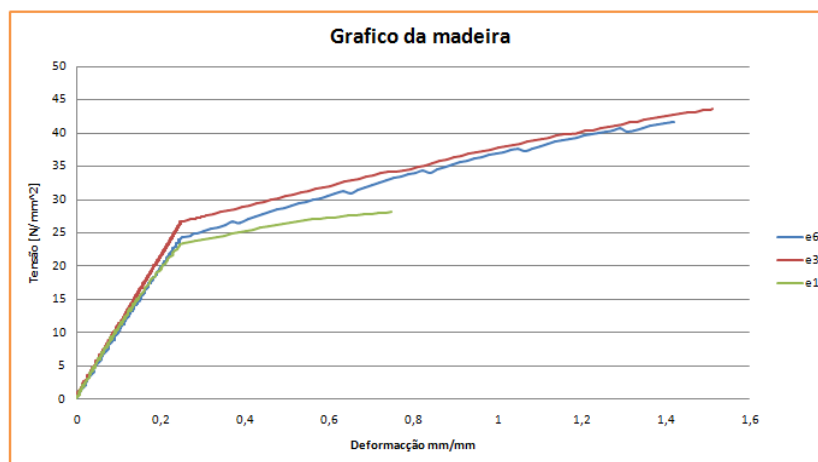


Figura D.5 – Curva Tensão/Deformação do ensaio de tracção de provates em madeira.

Anexo E - Diferentes sistemas que foram testados e não foram englobados na solução final

Durante o decorrer desta dissertação não foram apenas projectadas e testadas os elementos que estão integrados na solução final do sistema. Foram estudados algumas soluções que, na fase de projecto e fabrico, se revelavam robustos mas que na fase de montagem e calibração não foi possível a sua implementação na solução final. Desenvolveram-se diferentes soluções, nomeadamente, um processo automático para inclinação do espelho. O espelho era colado num suporte, (figura E.1.(a)) e a sua inclinação era provocada por um parafuso que funcionava como cunha, quanto mais o parafuso era apertada maior inclinação era provocada no espelho para a obtenção do *Shear*.

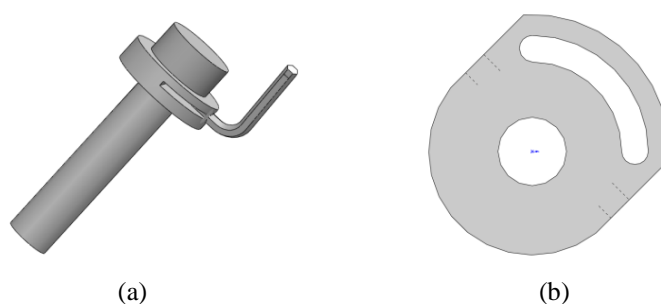


Figura E.1.(a) – Peça de inclinação do espelho (b) Solução para o limitador.

Ainda neste sistema, foi estudado a incorporação de um motor eléctrico passo a passo para controlar a rotação e a posição do espelho de forma automática, comandada por um computador. Como era apenas necessário controlar o ângulo de rotação entre 0° e 90°, foi desenvolvida uma nova peça que limitasse a rotação a esses valores angulares. Na figura E.1.(b) apresenta-se a peça que se desenvolveu nesse sentido.

Na figura E.2 podem ver-se as peças referidas, depois de maquinadas, na fase de ajuste e montagem no sistema.

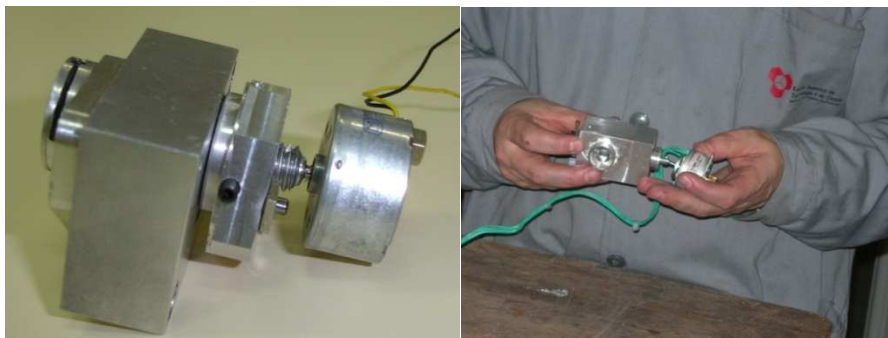


Figura E.2 – Solução final do sistema de controlo automático da inclinação do espelho.

Esta solução acabou por se ter posto de lado pela dificuldade do controlo da posição inicial do motor passo a passo. A solução de apertar o parafuso para inclinar o espelho verificou-se que, para além, de pouco prática gerava um posicionamento angular pouco rigoroso.

A peça de suporte para o espelho colado no PZT também foi, inicialmente, projectada de forma mais simples. Esta, era constituída por um perno roscado com uma cavidade para o PZT e uma porca normalizada que iria ajustar todo este sistema. Na figura E.3 apresenta-se a imagem do primeiro sistema de suporte ao PZT.

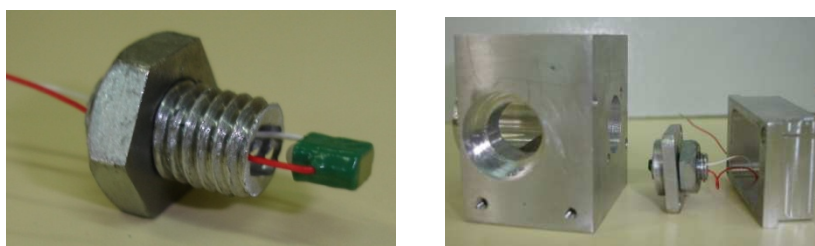


Figura E.3 – Solução testada do sistema do PZT com o espelho.

Existia também uma peça que servia de tampa para proteger o sistema de perturbações.

Este sistema não avançou para a solução final, pelo facto do passo do veio roscado ser demasiado grande para a precisão de posicionamento do espelho necessária a um sistema de elevada resolução.

Foi também concebido um sistema que permitisse uma elevada flexibilidade no posicionamento e rotação dos díodos laser. Assim, foi projectado e executado um sistema para fixar os díodos laser num perfil bosh rectangular, permitindo a sua rotação em torno de um eixo. Desta forma, seria possível utilizar dois díodos laser, cada um deles teria dois graus de liberdade independentes, uma translação ao longo da calha do perfil e uma rotação em torno de um eixo perpendicular à direcção do movimento de translação. Na figura E.5 está a representação do sistema desenvolvido e fabricado.

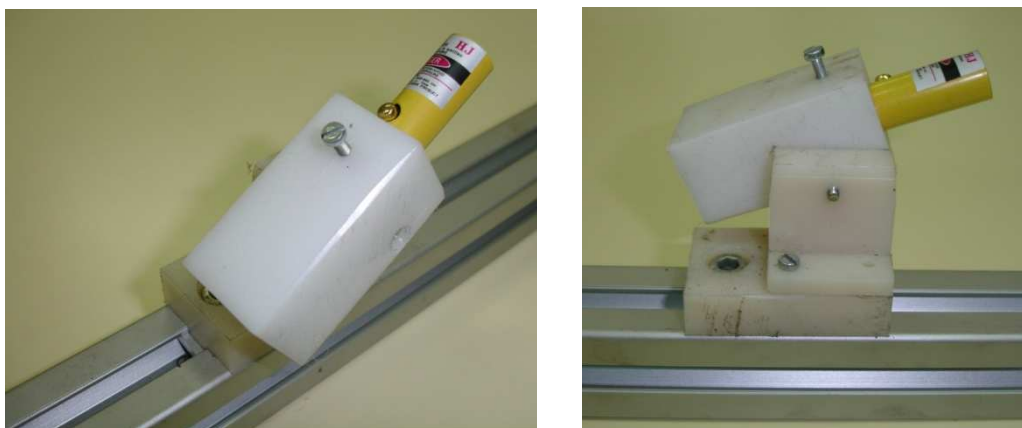


Figura E.5 – Solução testada do sistema de apoio e fixação do laser.

Este sistema, embora funcional, acabou por não fazer parte da solução final devido ao facto de se terem utilizado outro tipo de lasers que não necessitava este sistema de apoio.